



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA DE UM
SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL**

EZEQUIEL COSER

Lajeado, novembro de 2019

Ezequiel Coser

CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA DE UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Me. Anderson Giacomolli

Lajeado, novembro de 2019

Ezequiel Coser

CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA DE UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica:

Prof. Me. Anderson Giacomolli - orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado, novembro de 2019

AGRADECIMENTOS

A minha família, por todo apoio e ajuda prestada durante o período que estive cursando a minha segunda graduação em engenharia, pois sem eles a concretização deste sonho não seria possível.

A minha esposa Carine Paula Walter e minha filha Lara Walter Coser, pelo seu apoio e compreensão nos momentos de minha ausência, e por ser paciente comigo quando me encontrava estressado com minha monografia.

Ao meu orientador, que viu futuro no meu trabalho e aceitou guiar-me para sua implementação e a BRF S.A pela confiança por disponibilizar a sua estrutura para que fosse possível a aplicação do mesmo.

Por fim, agradeço a Deus que tornou tudo isso possível.

RESUMO

Na atual situação mundial de escassez de recursos, a economia de energia elétrica tornou-se algo relevante, o número crescente de cargas não-lineares, bem como altas taxas de energia pagas pelos consumidores com tributações adicionais, tais como multas por baixo ou alto fator de potência, tarifas elevadas em horários de ponta e necessidade de elevados contratos de demanda exemplificam a importância e a necessidade de um controle sobre os recursos energéticos. Diante deste contexto, para suprir possíveis ultrapassagens de contrato e encargos que elevam o custo da área energética, o presente trabalho apresenta a importância de realizar uma administração eficiente no consumo de energia elétrica com a seletividade ou modulações de cargas através de controle de demanda de energia.

Palavras-chave: Energia Elétrica, Consumo de Energia, Seletividade de Cargas, Controle de Demanda.

ABSTRACT

In the current world resource scarcity situation, energy savings have become somewhat relevant, the increasing number of nonlinear loads as well as high energy rates paid by consumers with additional taxes such as low or high factor fines power, high peak hour rates and the need for high demand contracts exemplify the importance and need for control over energy resources. Given this context, to meet possible contract overruns and charges that raise the cost of the energy area, the present work presents the importance of performing an efficient administration in the electric energy consumption with the selectivity or load modulation through energy demand control.

Keywords: Electric Power, Energy Consumption, Load Selectivity, Load Modulation, Demand Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil sem importação contratada.....	13
Figura 2 - Modelo OSI.....	18
Figura 3 - Modelo TCP/IP.....	21
Figura 4 - Ligação ponto a ponto bidirecional.....	23
Figura 5 - Fragmento TCP.....	24
Figura 6 - O cabeçalho UDP.....	25
Figura 7 - Cabeçalho Ipv4.....	27
Figura 8 - Formato de um pacote ARP segundo.....	28
Figura 9 - Formação e composição de uma mensagem ICMP.....	28
Figura 10 - Diferença entre o envio de pacotes unicast e multicast.....	29
Figura 11 - Encapsulamento de dados.....	31
Figura 12 - Os modelos OSI e TCP/IP.....	31
Figura 13 - Onda corrente contínua e alternada.....	33
Figura 14 - Triângulos das potências.....	34
Figura 15 - Horários de ponta e fora de ponta para uma unidade consumidora.....	45
Figura 16 - Curva típica de fornecimento de potência de uma concessionária.....	46
Figura 17 - Método de controle por janela móvel.....	51
Figura 18 - Método preditivo adaptativo.....	52
Figura 19 - Método retas de cargas ou retas inclinadas.....	52
Figura 20 - Medidor de grandezas elétricas power monitor 500 e 1000 utilizado na coleta de dados.....	55
Figura 21 - Consumo de energia por processo produtivo.....	55
Figura 22 - Consumo de energia por processo produtivo aves setorizados.....	56
Figura 23 - Diagrama de blocos sistema implementado.....	58
Figura 24 - Instalação medidor na entrada do sistema de energia.....	59
Figura 25 - CLP principal que se comunica com o medidor de energia.....	60
Figura 26 - Leitura em tempo real apresentada em gráfico via supervisório.....	60
Figura 27 - Configuração de agendamento disponível em supervisório.....	63
Figura 28 - Componentes do sistema de aeração, injeção de ar.....	65
Figura 29 - Exibição do supervisório de controle do sistema de aeração.....	66
Figura 30 - Demanda dentro da faixa de contrato.....	66
Figura 31 - Alarme nível 1 onde a demanda atingiu 95% da contratada.....	67
Figura 32 - Alarme nível 2 onde a demanda atingiu 100% da contratada.....	68
Figura 33 - Alarme nível 3 onde a demanda atingiu 103% da contratada.....	69
Figura 34 - Consumo de energia antes e após o início de desligamento de cargas.....	69
Figura 35 - Reestabilização das cargas do sistema de tratamento de efluentes.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Protocolos da camada de aplicação.....	22
Tabela 2 - Algumas portas atribuídas.....	25
Tabela 3 - Divisão do grupo A em seus subgrupos.....	42
Tabela 4 - Dados em potencial elétrico.....	53
Tabela 5 - Dados gerais de energia elétrica realizada na unidade de Lajeado.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

MW: Megawatts
MME: Ministério de minas e energia
ANEEL: Agencia nacional de energia elétrica
TP: Transformador de potência
TC: Tranformador de corrente
CLP: Controlador lógico programável
GM: General Motors
TI: Tecnologia da informação
TA: Tecnologia da automação
OSI: Open Systems Interconnection
API: Application Programming Interface
LAN: Local Area Network
WAN: Wide Area Network
RPC: Remote Procedure Calls
SQL: Structured Query Language
TCP: Transmission Control Protocol
UDP: User Datagram Protocol
IP: Internet Protocol
ICMP: Internet Control Message Protocol
IGMP: Internet Group Management Protocol
MAC: Mandatory Access Control
kWh: Quilowatt-hora
kvar: Quilovolt-ampère-reactivo
kW: Quilowatts
W: Watts
Mwh: Megawatt-hora
V: Volts
H.P: Horário de ponta
H.F.P: Horário fora de ponta
CV: Cavalo vapor

VAR: Volt-ampère reativo

VA: Volt-ampère

GM: General Motors

PPM: Partes por milhão

ICMS: Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços

QGBT: Quadro geral de baixa tensão

PPM: Partes por milhão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivo específico.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Controlador lógico programável (CLP).....	16
2.2	Redes ethernet.....	17
2.3	Modelo de referência OSI (Open Systems Interconnection).....	18
2.3.1	Aplicação – camada 7.....	18
2.3.2	Apresentação – camada 6.....	19
2.3.3	Sessão – camada 5.....	19
2.3.4	Transporte – camada 4.....	19
2.3.5	Rede – camada 3.....	19
2.3.6	Link de dados – camada 2.....	20
2.3.7	Física – camada 1.....	20
2.4	Modelo TCP/IP.....	20
2.4.1	Aplicação – camada 4.....	22
2.4.2	Transporte – camada 3.....	22
2.4.3	Internet – camada 2.....	26
2.4.4	Interface com a rede – camada 1.....	30
2.5	Comparativo entre os modelos (OSI e TCP/IP).....	30
3	ENERGIA ELÉTRICA.....	32
3.1	Medidores de Energia Elétrica	34
3.1.1	Medidores Eletrônicos Energia Elétrica	35
3.1.2	Princípios de operação.....	36
3.1.3	Transformadores.....	36
3.1.4	Precisão.....	38
3.1.5	Limitações.....	38
3.2	Conexões dos medidores de energia.....	39
3.2.1	Medição Direta.....	39
3.2.2	Medição Indireta.....	39
3.3	Métodos de Tarificação.....	40
3.4	Estrutura Tarifária.....	40
3.5	Classificação dos Consumidores.....	41
3.5.1	Consumidores do Grupo A.....	41
3.5.1.1	Tarificação Convencional.....	42
3.5.1.2	Tarificação Horó-Sazonal.....	43
3.5.2	Consumidores do Grupo B.....	44
3.6	Horários Fora de Ponta e de Ponta.....	45
3.7	Períodos seco e úmido.....	46
3.8	Demanda de energia elétrica.....	46
3.9	Ultrapassagem da Demanda.....	48
3.10	Controle de demanda.....	49
3.11	Funcionamento.....	50
3.12	Métodos de controle.....	50

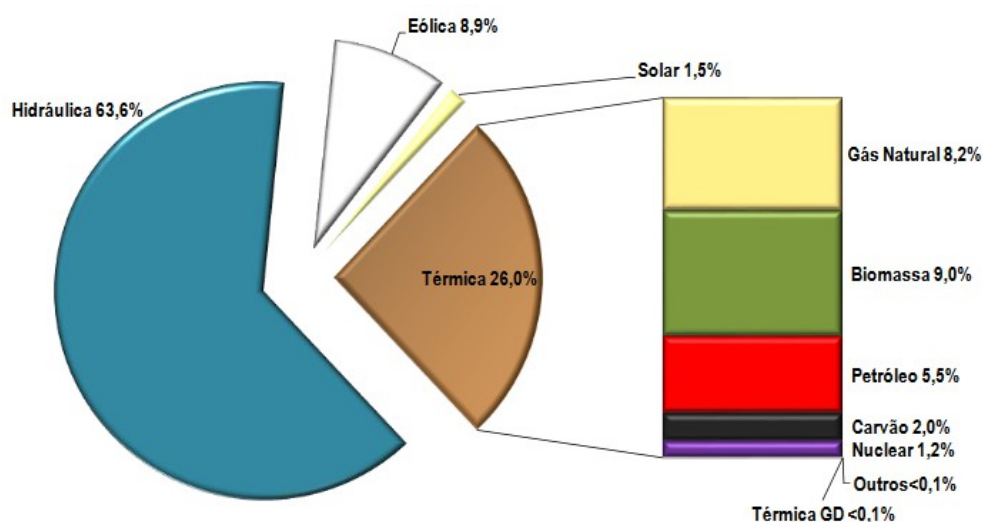
3.12.1	Método janela móvel.....	50
3.12.2	Método preditivo adaptativo.....	51
3.12.3	Método de retas de cargas ou retas inclinadas.....	52
4	METODOLOGIA.....	53
5	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....	58
5.1	Aplicação no cenário descrito e homologação dos resultados.....	64
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A energia está presente em nossa vida de diversas maneiras. Por exemplo, quando usamos motores ou músculos, quando acendemos o queimador de um fogão, quando nos alimentamos, ou mesmo quando nos informamos pela televisão, ou nos jornais, que frequentemente se referem a alguma questão energética no Brasil ou no mundo. Por tal diversidade, o campo dos estudos energéticos é vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até os aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, permitindo uma abordagem que considere apenas os temas de caráter técnico ou envolva seus componentes socioeconômicos e ambientais, inclusive quanto à sua evolução histórica e suas perspectivas futuras (VIANA; BORTONI; NOGUEIRA, 2012).

Segundo o boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro, fornecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica, a capacidade de geração instalada e fiscalizada no Brasil, em Outubro/2019, chegou a 167.622 Megawatts (MW), sendo 63,6% provenientes de usinas hidrelétricas, 26% de usinas termelétricas, 8,9% de usinas eólicas, e 1,5% de usinas solares (ENERGIA, 2019).

Figura 1 -Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil sem importação contratada.



Fonte: Do autor com base em Aneel e MME (2019).

Analisado os dados do gráfico acima, o Brasil depende muito da energia elétrica gerada através de usinas hidrelétricas, dependentes de recursos naturais. Essas, no que lhe concerne, necessitam dos mananciais dos rios e seus reservatórios, caso estes estiverem com níveis muito baixos e, em alguns casos, até abaixo do mínimo para a geração de energia elétrica é necessário que sejam tomadas medidas para sanar a demanda de energia no Brasil, as quais trazem um aumento considerável do preço para o consumidor (ENERGIA, 2019).

Pelo ponto de vista do fornecimento, a existência de um controle de demanda nas unidades consumidoras permite um melhor planejamento e maior aproveitamento do sistema de distribuição, minimizando investimentos no setor (FERNANDES, 2011).

A demanda é um dos principais fatores utilizados para o dimensionamento dos circuitos elétricos, é através deste dado que se dimensionam cabos, transformadores, equipamentos de proteção e etc (FERNANDES, 2011).

A Resolução da ANEEL nº 414 de 9 de setembro de 2010, incluiu a tarifação sobre a demanda, que na tarifa de energia elétrica representa a estrutura de geração e transmissão que a concessionária disponibiliza para o consumidor, respondendo tipicamente por 20% desta, representando, portanto, um insumo significativo. Com isso, as indústrias precisam de meios para controlar essa variável, já que a multa pela ultrapassagem da demanda (tipicamente três vezes maior do que a tarifa normal) muitas vezes não justifica a produção extra conseguida. Foi aí que começaram a surgir os primeiros controladores de demanda, que são os equipamentos destinados a monitorar e controlar essa variável, ajudando as indústrias a serem mais competitivas no mercado (ANEEL, 2019).

Segundo Vieira (2016), o controlador de demanda tem como função limitar o consumo de energia elétrica por meio do desligamento automático de algumas cargas de menor necessidade num determinado intervalo temporal.

1.1 Objetivos

A seguir, é apresentado o objetivo geral e os específicos:

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é realizar a implementação de um sistema de monitoramento de demanda de energia elétrica em uma indústria de alimentos de grande porte.

1.1.2 Objetivo específico

Considerando-se as questões levantadas o presente trabalho tem por objetivo projetar um sistema de controle de demanda de energia no Frigorífico da BRF S.A localizado na cidade de Lajeado RS. A aplicação se dará através da utilização de um controlador lógico programável interligado a uma rede Modbus e Ethernet TCP/IP com dispositivos multimedidores de leitura indireta TC (transformador de corrente) e TP (transformador de

potência). O sistema deverá realizar a leitura do consumo de energia elétrica, mantendo o controle das variáveis contratadas de demanda de energia evitando assim multas desnecessárias na fatura de energia elétrica.

No parque industrial, o local de escolha para o desenvolvimento do trabalho deu-se a partir da análise de cargas e da possibilidade de desligamento sem causar prejuízos ao processo produtivo, neste contexto a aplicação foi desenvolvida na área de utilidades (sistema de tratamento de efluentes através de injeção de ar difuso), a qual comporta os equipamentos com as cargas mais elevadas, na faixa de 150 a 500cv.

O funcionamento do sistema será gerenciado por um controlador lógico programável o qual está conectado via rede a um dispositivo multimedidor, o mesmo realizará a leitura do consumo de energia do parque industrial armazenando as informações em supervisorio para que possam ser apresentadas e monitoradas pela operação local. Havendo um consumo acima da demanda contratada, será informado ao operador do sistema (local o qual está aplicado o desenvolvimento do trabalho), que o consumo está excedido, e uma ação corretiva deverá ser tomada. Caso não seja realizado um procedimento de redução de cargas via interferência operacional, o sistema por si só realizará a redução de consumo até a estabilização dentro do valor contratado e faixa de controle. Todas as informações e alarmes serão informados a partir de valores pré-determinados, seguindo uma ordem cronológica através da leitura de consumo em tempo real.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo deste capítulo é apresentar tópicos referentes ao controlador lógico programável, conceitos básicos de uma rede ethernet, a qual está presente nos dispositivos de controle e medição, assim como no protocolo de comunicação do trabalho proposto.

2.1 Controlador lógico programável (CLP)

Segundo a norma Nema (National Electrical Manufacturers Association), ICS3-1978, parte ICS3-304, apud Kopelovski (2010, p.3) define um controlador programável como:

"Aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementação de funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética para controlar, através de módulos de entradas e saídas, várias máquinas ou processos. Um computador digital que é utilizado para desempenhar as funções de um controlador programável é considerado dentro deste escopo. Estão excluídas as chaves tambores e outros sequenciadores mecânicos".

O controlador lógico programável surgiu na indústria automobilística nos Estados Unidos mais precisamente na General Motors em 1968 sendo o substituto dos painéis a lógica a reles, os primeiros CLP's já eram mais confiáveis que os reles, pois sua lógica não utilizava movimento mecânico (HENRIQUE, 2003).

A capacidade de alterar a programação do CLP para indústria foi algo de muito prestígio, pois na utilização de lógica a relés quando desejava-se produzir um novo modelo, era preciso fazer várias alterações na lógica e com o uso do controlador lógico programável todo esse processo se tornou mais rápido (KLEPA; PEREIRA, 2013).

As características do CLP se resumem por ser totalmente programável, pois um mesmo CLP pode ser programado diversas vezes, foi um equipamento desenvolvido para trabalhar em ambiente industrial e pode ser considerado flexível para uma ampla área e funções distintas (KLEPA; PEREIRA, 2013).

Essas características agregadas em um único equipamento despertou o interesse de outras empresas como a Reliance Electric, Modicon, Shuthers-Dunn entre outras. A Modicon foi primeira a ter resultados e começar a concorrer com a GM no ano de 1970, mas outras empresas já estavam interessadas na idéia de desenvolver um controlador lógico (KLEPA; PEREIRA, 2013).

Na década de 70 o CLP desenvolveu-se com a tecnologia eletrônica, nesse período foram lançados vários componentes eletrônicos como microprocessador que facilitou realizar operações aritméticas, acumuladores, registradores que antes eram usadas lógicas discretas, os

circuitos integrados possibilitou a redução de tamanho, diminuição de custos e foi na década de 80 que os CLP's foram amplamente difundidos na indústria devido a sua funcionalidade de aplicações (HENRIQUE, 2003).

2.2 Redes ethernet

Segundo McQuerry (2008) e Sportack (2004), uma rede são diversos dispositivos conectados em um sistema final, como computadores e servidores, os quais se comunicam entre si, compartilhando recursos físicos e lógicos. Mais especificamente, uma rede ethernet é uma infraestrutura que fornece a conectividade com múltiplos sistemas de computação autônoma, de modo a comunicar (por exemplo, *e-mail*) e compartilhar recursos. Esses recursos incluem *hardware*, como mídia de armazenamento e periféricos, *software*, e as informações/dados.

As Redes Ethernet se consolidaram como padrão de comunicação entre computadores desde sua invenção, como a Automação Industrial se convergiu ao longo dos últimos anos com a Tecnologia da Informação (TI), as Redes Ethernet se desenvolveram dentro do universo da Tecnologia da Automação (TA), ganhando características que delinearam um cenário de total aderência aos novos projetos e atualização de sistemas legados de rede para automação e controle.

As redes salientam Soares, et al (1995), surgiram para viabilizar a troca e o compartilhamento de informações e dispositivos periféricos, preservando a independência das várias estações de processamento e permitindo a integração em ambientes de trabalho cooperativos.

Uma rede local, refere Castelli (2004), envia e recebe pacotes a uma velocidade muito maior do que conexões telefônicas, porém, existe limitação quanto à distância da estação até o concentrador. Tendo em vista essas características de velocidade e distância, a utilização das redes locais disseminou-se rapidamente em ambientes geograficamente agrupados, como em universidades e empresas, que se enquadram neste agrupamento e necessitam de velocidade maior na comunicação de dados.

Segundo Castelli (2004), três características diferenciam uma rede de outra:

- redes podem ser configuradas em diferentes topologias, que é a forma de interligação dos dispositivos. As duas topologias mais conhecidas são anel, em que um dispositivo conecta-se a outro até fechar o anel, e estrela, em que cada dispositivo é conectado ao concentrador;

- as redes seguem diferentes protocolos, que são as normas de envio e recebimento de pacotes;
- as redes são conectadas por algum meio físico: fios de cobre, fibra óptica ou *wireless*, com características específicas para cada meio.

2.3 Modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*)

O modelo OSI trata da interconexão de sistemas que estão abertos à comunicação com outros sistemas (TANENBAUM, 1997). Compreende um modelo de sete camadas, como é possível observar na Figura 2.

Figura 2 - Modelo OSI



Fonte: Do autor com base em Torres (2009).

2.3.1 Aplicação – camada 7

A camada de aplicação faz a interface entre o protocolo de comunicação e o aplicativo que irá trafegar por meio da rede, como, por exemplo, navegadores de *internet*, softwares de mensagens instantâneas, leitores de *e-mail*, entre outros. Esta é a camada que faz a interface com os usuários por meio dos programas utilizados pelo usuário e que fazem uso da rede. Importante salientar que a maioria dos aplicativos pode estar em uso ao mesmo tempo acessando dados diferentes, como é o caso dos navegadores, em que é possível, ao mesmo tempo, o acesso a mais de um *site* (TORRES, 2009).

2.3.2 Apresentação – camada 6

Esta camada é responsável por apresentar os dados de e para a aplicação e a sessão, convertendo-os para que cada uma das camadas os entenda, ou seja, estabelece um formato comum a ser usado na transmissão desse dado. Esta camada é comumente chamada de tradutora. Exemplos de arquivos são formatos gráficos: *jpg*, *png*, *bmp*; formatos de som e vídeo: *mp3*, *divx*, *mp4*. Nesta camada é possível utilizar algum esquema de criptografia em que os dados serão decriptografados na camada 6 do destino (NOONAN; DUBRAWISKY, 2006).

2.3.3 Sessão – camada 5

Permite que duas aplicações em computadores diferentes estabeleçam e mantenham uma sessão de comunicação. Possibilita que em uma rede de computadores diversos dispositivos possam conectar-se a diversos outros dispositivos e, ao mesmo tempo, em diversos aplicativos, assegurando que os dados serão entregues à aplicação correta. Alguns exemplos de protocolos são o *Remote Procedure Calls (RPC)*, no qual o servidor executa procedimentos que são requisitados pelo cliente; o *NetBios*, que é uma *Application Programming Interface (API)* utilizada basicamente por sistemas *Windows*; e a *Structured Query Language (SQL)*, que são conexões a servidores de banco de dados (DOHERTY; ANDERSON; MAGGIORA, 2007).

2.3.4 Transporte – camada 4

Responsável por adquirir os dados enviados pela camada de sessão e dividi-los em pacotes que serão transmitidos através da rede, por meio de um método que independe de aplicação, executando os procedimentos de segmentação e remontagem. Os dois principais exemplos de protocolos desta camada são *Transmission Control Protocol (TCP)* e *User Datagram Protocol (UDP)* (HELD, 2003).

2.3.5 Rede – camada 3

Responsável pelo endereçamento dos pacotes, convertendo endereços lógicos em físicos, fazendo com que o pacote chegue ao destino. É nela a maioria dos protocolos de comunicação funcionam, confiando nas camadas 1 e 2 para enviar e receber mensagens de e para outros dispositivos de rede. Nesta camada, é acrescentado cabeçalho que identifica os

endereços *Internet Protocol (IP)* de origem e de destino do pacote. É neste nível que ocorre o roteamento IP (TANENBAUM, 2003).

2.3.6 *Link de dados – camada 2*

Também chamada de camada de enlace, pega os pacotes de dados recebidos da camada de rede e os transforma em quadros que serão trafegados pela rede. É responsável por estabelecer a mais elementar forma de comunicação entre dois dispositivos de rede, para que possam trocar dados em protocolos da camada 3. Nesta camada os dispositivos são identificados pelo endereço conhecido como *Media Access Control (MAC)* (TANENBAUM, 2003).

2.3.7 *Física – camada 1*

Faz a transformação dos quadros enviados pela camada de enlace em sinais compatíveis com o meio de transmissão, que pode ser cobre, fibra óptica, *wireless*, entre outros. Esta camada também fornece um método para que o dispositivo receptor faça a validação considerando se os dados estão ou não corrompidos (TANENBAUM, 2003).

2.4 *Modelo TCP/IP*

TCP/IP é um padrão aberto de protocolos de comunicação que é o padrão utilizado na *internet*, escolhido para esta finalidade, pois contém todos os mecanismos fundamentais para suportar todo e qualquer tipo de comunicação de rede (CASTELLI, 2004). Segundo Sportack, (2004), foi o protocolo de rede que mudou o mundo, revolucionou a forma como as pessoas se comunicam, e trocam informações e fazem negócios.

O nome *TCP/IP* se refere a um conjunto de protocolos de comunicação, recebendo o modelo o nome de dois dos protocolos que pertencem a ele, o *Transmission Control Protocol (TCP)* e o *Internet Protocol (IP)*. Também encontra-se na literatura o nome *Internet Protocol Suite (IPS)*, que, apesar de aceito, não é comumente utilizado (HUNT, 2002).

A grande popularidade do protocolo *TCP/IP*, conforme Hunt (2002), pode ser explicada por quatro características principais:

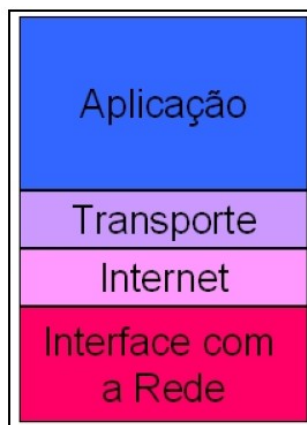
- toda a implementação e todas as normas são abertas, ou seja, independente de *hardware* ou *software*, é possível implementar o protocolo *TCP/IP*, podendo a comunicação ser estabelecida entre quaisquer dispositivos que implementem o protocolo;

- independente de hardware de rede, ou seja, o *TCP/IP* pode integrar diferentes tipos de rede, sejam sem fio, redes de cobre, ópticas, linhas *dial-up*, redes *ethernet*, enfim, qualquer meio físico ou tipo de transmissão;
- um sistema de endereçamento comum, que permite a comunicação entre dispositivos independente do tamanho da rede, seja uma rede com apenas dois computadores ou a *internet*, na qual existem incontáveis dispositivos conectados e trocando informações ao mesmo tempo;
- protocolos padronizados, consistentes e amplamente disponíveis para serviços aos usuários.

Atualmente, implementações do *TCP/IP* estão presentes em computadores de todos os portes, aparelhos celulares, *storages*¹, impressoras, eletrodomésticos, enfim o *TCP/IP* é cada vez mais encontrado em dispositivos que passam a comunicar-se, o que permite novos benefícios à população em geral.

Segundo Hunt (2002), não existe consenso em descrever o *TCP/IP* em camadas, porém, normalmente, divide-se o *TCP/IP*, assim como o modelo OSI, em camadas. Enquanto o modelo OSI é dividido em sete camadas, o *TCP/IP* é dividido em apenas quatro, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Modelo *TCP/IP*



Fonte: Do autor com base em Torres (2009).

¹ *Storage* é um dispositivo exclusivamente dedicado ao armazenamento de informação. Disponível em: <<http://www.kerkeberos.net/2009/01/07/solucoes-para-a-criacao-do-seu-servidor-nas-network-attachedstorage-domestico/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

2.4.1 Aplicação – camada 4

É a camada que interage com o usuário, ou seja, nela encontram-se aplicativos como clientes de *e-mail*, navegadores de *internet*, enfim, diversos softwares que utilizam a rede e interagem com o usuário final (HUNT, 2002).

Para fácil entendimento do funcionamento, é importante destacar a existência de duas entidades na comunicação: o emissor e o receptor. Para o envio, os dados do usuário emissor são combinados com os dados do aplicativo, sendo encapsulados com a adição de algumas informações, como a porta de origem. Os dados são passados para a camada de transporte. Quando do recebimento, o receptor, na camada de aplicação, remove o cabeçalho da aplicação, provê o tratamento necessário para finalizar a transação e confirma que o processo foi concluído (TORRES, 2009).

A Tabela 1 exemplifica alguns protocolos da camada de aplicação:

Tabela 1 - Protocolos da camada de aplicação

Protocolo	Função
<i>Telnet</i>	<i>Login remoto</i>
<i>File Transfer Protocol (FTP)</i>	Transferência de arquivos
<i>Simple Mail Transfer Protocol (SMTP)</i>	Entrega de correio eletrônico
<i>Hypertext Transfer Protocol (HTTP)</i>	Acesso a <i>web sites</i>
<i>Domain Name System (DNS)</i>	Resolução de nomes de domínios
<i>Open Shortest Path First (OSPF)</i>	Protocolo de roteamento
<i>Network File System (NFS)</i>	Compartilhamento de diretórios

Fonte: Do autor com base em Hunt (2002).

2.4.2 Transporte – camada 3

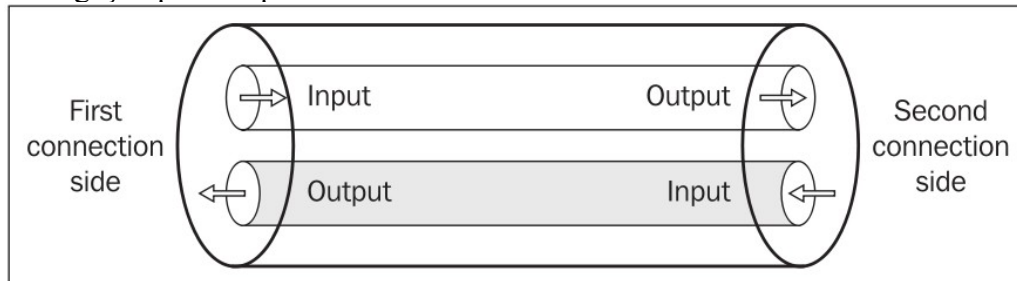
A camada *Host-to-Host Transport Layer* é geralmente abreviada e traduzida como camada de transporte. Os dois protocolos mais importantes desta camada são o *Transmission Control Protocol (TCP)* e o *User Datagram Protocol (UDP)*. A diferença entre o *TCP* e o *UDP* é que o primeiro tem conexão orientada a serviço, ou seja, o destinatário confirma o recebimento do dado. Quando da implementação de aplicações, o desenvolvedor escolhe qual protocolo melhor se enquadra aos softwares, tendo em vista que o *TCP* é confiável e possui mecanismos de detecção e correção de erros, enquanto o *UDP* tem menor *overhead* pois dá acesso direto a um serviço de entrega de datagramas (HUNT, 2002).

2.4.2.1 TCP

Segundo Tanenbaum (2003), o protocolo *TCP* foi concebido para ser um protocolo de transporte confiável, fim a fim, em redes interconectadas, que apresentam diferentes topologias, banda, tipos e tamanho de pacotes, entre outros. O *TCP* é orientado à conexão, ou seja, cria um circuito virtual, *full duplex* (tem a capacidade de enviar e receber dados simultaneamente) entre duas aplicações, sendo todos os *bytes* numerados para que seja possível a retransmissão em caso de falhas.

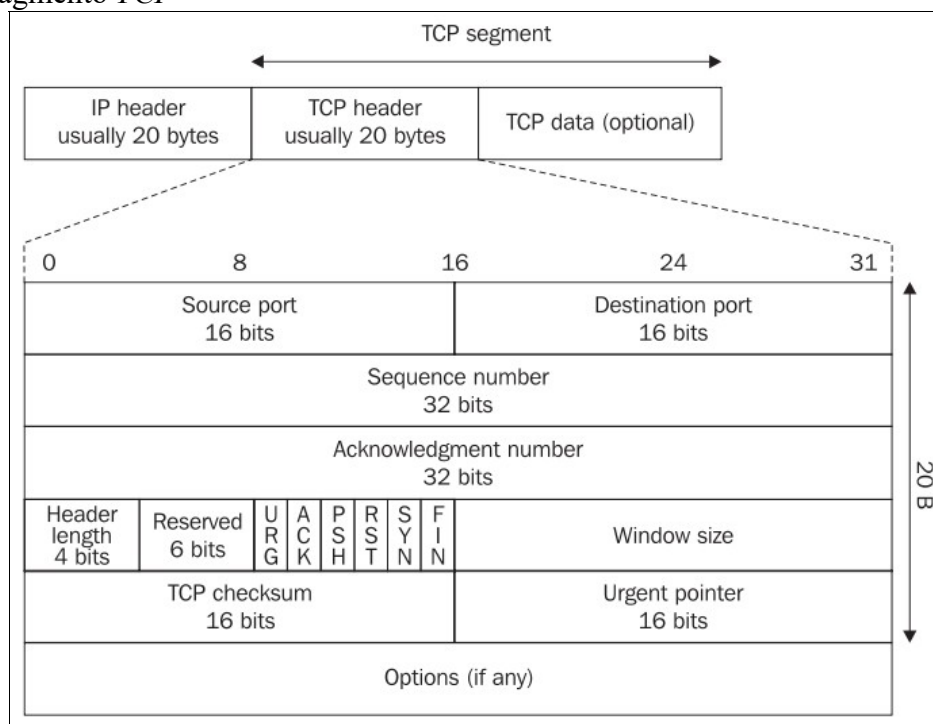
Na Figura 4 é possível observar, de maneira ilustrativa, o túnel virtual criado pelo protocolo *TCP*, com sua característica ponto a ponto e *full duplex*.

Figura 4 - Ligação ponto a ponto bidirecional



Fonte: Dostálek e Kabelová (2006, p. 239).

O detalhamento da estrutura de um segmento *TCP* pode ser visto na Figura 5, na qual se identificam alguns campos: porta de origem e de destino, usada para identificar as portas no emissor e no receptor; o número de sequência, utilizado para o controle do *TCP*, visto que os pacotes devem ser enviados e recebidos em ordem; *checksum*, que é utilizado para verificar a integridade dos dados, entre outros campos.

Figura 5 - Fragmento *TCP*

Fonte: Dostálek e Kabelová (2006, p. 241).

O estudo dos protocolos de rede pode confundir as funções dos dois protocolos que formam o nome do modelo *TCP/IP*. Segundo Dostálek e Kabelová (2006), o *IP* transmite dados entre dispositivos, enquanto o *TCP* transfere dados entre as aplicações nestes dispositivos, utilizando para tanto a porta na qual o serviço está sendo executado.

Carne (2004) explica que o protocolo *TCP* somente é utilizado com endereços *unicast* (entre dois *hosts*), não podendo ser usado para endereços *multicast* (grupo de computadores) ou *broadcast* (todos os dispositivos no mesmo domínio de *broadcast*).

Todas as aplicações que utilizam o protocolo *TCP* têm a garantia de que os dados serão entregues. Porém, destacam Dostálek e Kabelová (2006), que essa proteção garantida pelo *TCP* não oferece proteção contra ataques a rede de dados. A garantia do protocolo se limita à entrega dos dados a outra ponta.

Os pontos de origem e destino na conexão são identificados por um número de porta que, no caso do protocolo *TCP*, pode variar de 0 a 65535. No caso da *internet*, a aplicação de destino é endereçada por meio de um endereço *IP*, um número de porta e o protocolo, transferindo o *IP* e os pacotes para um determinado dispositivo, que pode executar vários aplicativos simultaneamente, visando entender o sistema operacional para tanto, é utilizado porta de destino, que entende para qual aplicação deve ser entregue o pacote *TCP* (DOSTÁLEK; KABELOVÁ, 2006).

Conforme Tanenbaum (2003), as portas de 0 até 1.024 são conhecidas e reservadas, com regulação feita pela *Internet Assigned Numbers Authority (IANA)*. A Tabela 2 relaciona alguns serviços e portas.

Tabela 2 - Algumas portas atribuídas

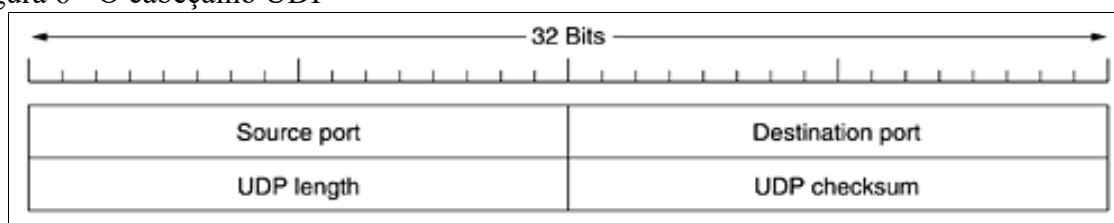
Porta	Protocolo	Uso
21	FTP	Transferência de arquivos
23	TELNET	<i>Login</i> remoto
25	SMTP	Entrega de correio eletrônico
69	TFTP	Transferência de arquivos
79	FINGER	Verificação de informações de usuários
80	HTTP	Acesso a <i>web sites</i>
110	POP3	Acesso remoto a e-mails
119	NNTP	Notícias

Fonte: Do autor com base em Tanenbaum (2003).

2.4.2.2 User Datagram Protocol (UDP)

O *UDP* é um protocolo simples, destinado a aplicações que não exigem confirmação de entrega dos pacotes, ou seja, serviços não confiáveis. Ao enviar, o protocolo recebe os dados da camada superior, adiciona o número da porta de destino e calcula o *checksum*² (opcional), para que o receptor valide os dados e faça o processo contrário no recebimento. O cabeçalho é bastante pequeno (8 *bytes*), como pode ser visto na Figura 6, e o restante são dados. Sem as informações de porta, seria impossível o tráfego de pacotes a camada de transporte não teria o que fazer com eles explicam Carne (2004) e Tanenbaum (2003).

Figura 6 - O cabeçalho UDP



Fonte: Tanenbaum (2003, p. 434).

Segundo Tanenbaum (2003) é importante deixar claro algumas funcionalidades que o *UDP* não implementa, como controle de fluxo, controle de erros ou retransmissão de pacotes.

² *Checksum* é um dado de tamanho fixo calculado a partir de um bloco arbitrário de dados digitais com a finalidade de detectar erros acidentais que possam ter sido introduzidas durante a sua transmissão ou armazenamento. Disponível em: <<http://thefreedictionary.com/checksum>>. Acesso em: 14 jun. 2011.

2.4.3 *Internet – camada 2*

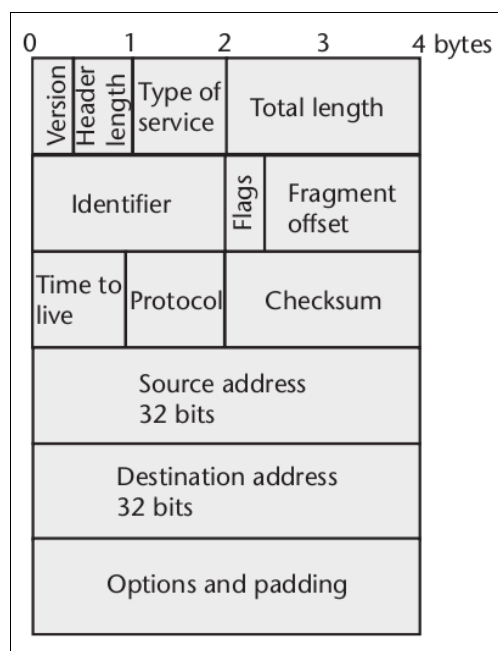
Também chamada de camada de rede, consiste em todos os protocolos utilizados para que os dispositivos de origem e destino se encontrem, independente de sua localização física, já que os datagramas da camada de transporte são analisados para definir a rota que será utilizada. No presente trabalho o objetivo restringe-se a dar uma visão sucinta de quatro protocolos pertencentes a esta camada.

2.4.3.1 *Internet Protocol (IP)*

É o protocolo mais importante nesta camada, considerado o protocolo responsável pelo funcionamento da *internet*. *Internet Protocol*, ou simplesmente *IP* corresponde à camada de rede, que é responsável pelo envio de datagramas entre dispositivos, contendo cada datagrama as informações necessárias para que o mesmo seja entregue ao destino (DOSTÁLEK; KABELOVÁ, 2006; CARNE, 2004).

Carne (2004) explica um datagrama *IP* como sendo formado pela combinação da camada de transporte e o cabeçalho adicionado pelo protocolo *IP*, contendo os endereços de origem e de destino. Cada tipo de rede define sua unidade máxima de transmissão, *Maximum Transmit Unit (MTU)*, que, em redes *ethernet*, tem por padrão o tamanho 1.500 *bytes*, sendo o protocolo *IP* que fragmenta os pacotes no emissor para adequar-se ao tipo da rede e monta os datagramas quando estes são recebidos pelo destinatário. Esse endereço é único na rede, seja *internet* ou redes internas, que permite aos dispositivos conseguir estabelecer a comunicação, ou seja, que os *hosts* comuniquem-se entre si.

Na Figura 6 os campos do cabeçalho *IP* são citados, dentre os quais se tem: versão, que indica o uso da versão 4 ou 6 do *IP*; tipo de serviço, um campo que pode ser utilizado para priorizar o tráfego conforme o tipo de serviço; *time to live*, que define o tempo de vida de um pacote, para que não fique trafegando eternamente na rede; *checksum*, utilizado para a verificação apenas do cabeçalho *IP*; endereço *IP* de origem e destino, que identifica os *hosts* envolvidos na troca de informações, entre outros.

Figura 7 - Cabeçalho *Ipv4*

Fonte: Carne (2004, p. 16).

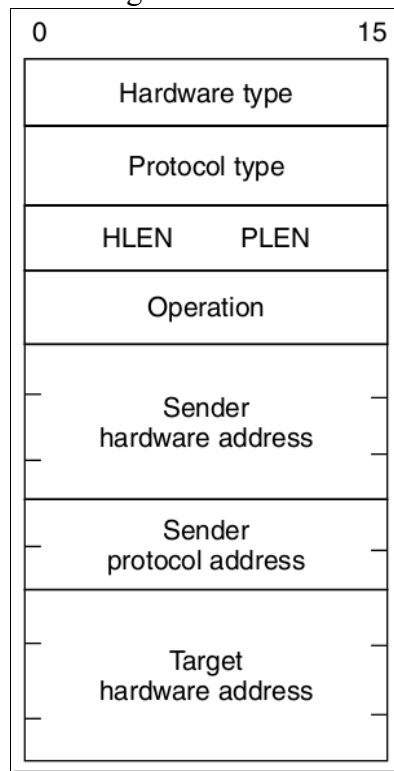
No presente trabalho o termo *IP* refere-se à versão 4 do protocolo.

2.4.3.2 *Address Resolution Protocol (ARP)*

Segundo Held (2003) e Carne (2004), o *ARP* resolve o endereço *IP* de um nó, que é configurado em alto nível, em seu endereço *MAC*, que fica gravado geralmente em um *chip* na placa de rede, em uma rede local, criando assim uma tabela que é gerada a partir de duas mensagens: *ARP request*, que envia *frames* via *broadcast* de nível *MAC*, e *ARP reply*, em que o endereço que responde ao *IP* solicitado responde com seu endereço *MAC*. Por meio dessa tabela e do endereço *MAC*, os pacotes podem ser transportados na *LAN*.

A Figura 8 ilustra um pacote *ARP*. O valor do campo *hardware*, definido para 1, significa *Ethernet*. O campo *Protocol* identifica o endereço do protocolo, em hexadecimal, identificando o valor 0800 o uso de endereços *IP*. Os campos *hardware length (HLEN)* e *protocol length (PLEN)* definem o tamanho, em *bytes*, dos endereços a serem utilizados (*hardware* e protocolo). *Operation* indica *ARP request* (1) ou *ARP reply* (2). Os demais campos referem-se ao protocolo e ao *hardware* do emissor e ao *hardware* do destinatário.

Figura 8 - Formato de um pacote ARP segundo

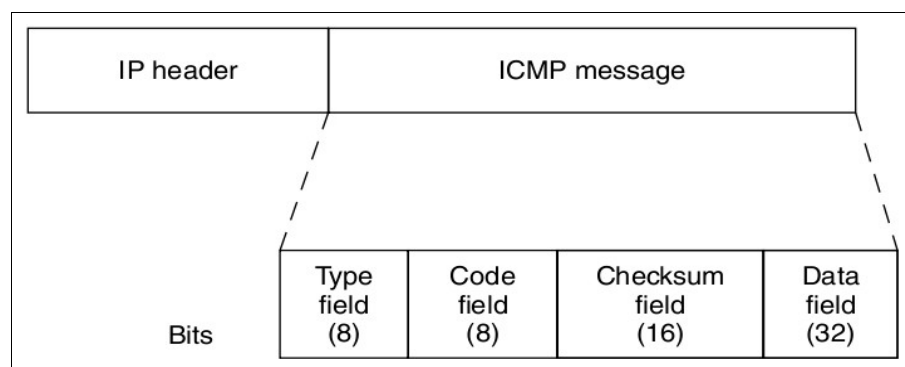


Fonte: Held (2003, p. 254).

2.4.3.3 Internet Control Message Protocol (ICMP)

O protocolo *ICMP* fornece um método para dispositivos *IP* trocarem informações sobre problemas com a rede que estejam impedindo a troca de pacotes. Mesmo que o protocolo *IP* não seja confiável e não garanta a entrega, é importante por ser uma maneira de informar ao remetente quando a entrega não é possível (HALL, 2000).

De acordo com Held (2003), uma mensagem *ICMP* é formada prefixando um cabeçalho *IP* à mensagem *ICMP*, sendo cada mensagem formada por quatro campos, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Formação e composição de uma mensagem *ICMP*

Fonte:Held(2003, p. 250).

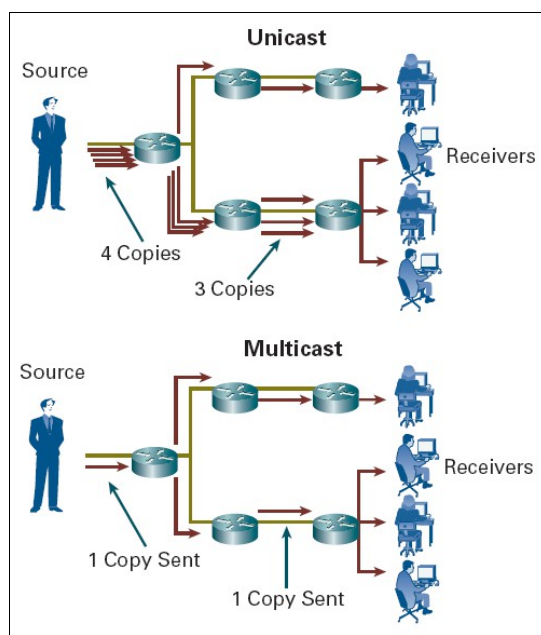
Segundo Tanenbaum (2003), a *internet* é acompanhada de perto por roteadores e, quando ocorre algo inesperado, o protocolo *ICMP* é utilizado para reportar os problemas. Este protocolo define cerca de uma dúzia de tipos de mensagens, como “destino não encontrado”, “tempo excedido”, entre outras. Hall (2000) divide essas mensagens em três famílias: “*Query (Reply)*” e “*Query (Request)*”, com quatro mensagens em cada família, e “*Error*” com cinco.

2.4.3.4 Internet Group Management Protocol (IGMP)

A necessidade de transferência de dados de forma simultânea para diversos nós em uma rede local evidenciou a necessidade de tráfego *IP multicast*³, como é o caso de videoconferência, em que existe o envio de pacotes de um para muitos. Para que isso seja possível, o protocolo *IGMP* envia um único datagrama para os nodos locais e o faz por meio de roteadores aos nodos distantes interessados em receber o tráfego. Para que isso seja possível, o protocolo *IGMP* oferece um mecanismo para que os *hosts* informem seu interesse em receber o tráfego ou interromper o recebimento deste (CARNE, 2004).

A Figura 10 diferencia o envio de pacotes *unicast* e *multicast*. Enquanto o primeiro envia uma cópia para cada destinatário, o segundo encaminha apenas uma cópia para todos os membros do grupo.

Figura 10 - Diferença entre o envio de pacotes unicast e multicast



Fonte: Doherty, Anderson e Maggiora (2008, p. 307).

³ *Multicast* é a entrega de uma mensagem ou informações a um grupo de computadores de destino simultaneamente em uma única transmissão. Disponível em: <<http://thefreedictionary.com/multicast>>. Acesso em: 14 jun. 2011.

O protocolo *IGMP* utiliza somente dois tipos de pacotes: consulta e resposta, cada um contendo algumas informações simples para controle. Sendo assim, é vagamente análogo ao protocolo *ICMP* (TANENBAUM, 2003).

2.4.4 Interface com a rede – camada 1

É a camada de mais baixo nível no modelo *TCP/IP*, estando intimamente ligada ao hardware através do *driver*⁴ do dispositivo. Os datagramas recebidos por esta camada são convertidos para serem transmitidos utilizando o meio físico disponível, seja *wireless*, óptico, cobre, entre outros.

Segundo Palma e Prates (2000), esta camada baseia-se em três conjuntos de protocolos: redes *Wide Area Network* (WAN), redes *Local Area Network* (LAN) e utilizados em redes discadas.

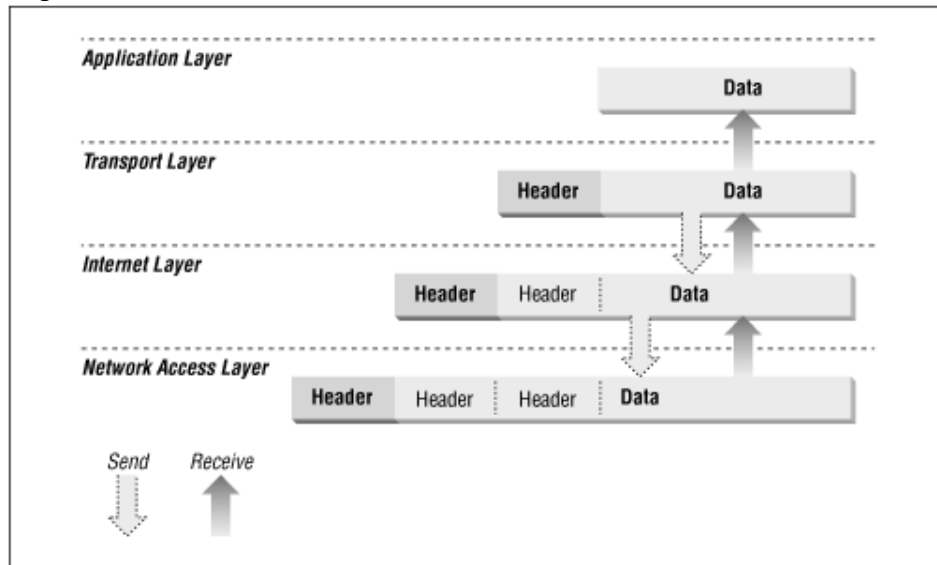
2.5 Comparativo entre os modelos (OSI e TCP/IP)

Uma questão que normalmente surge é a correlação entre as normas ISO OSI e o protocolo *TCP/IP*. Segundo Dostálek e Kabelová (2006), ambos são divididos em camadas e em cada camada são definidos os protocolos utilizados. De maneira geral, os modelos são incompatíveis.

Semelhante ao modelo OSI da ISO, no modelo *TCP/IP* os dados são passados para baixo na pilha no momento do envio e são levados até o topo quando do recebimento. (SPORTAK, 2004). Em cada camada são adicionadas informações do protocolo e de controle a fim de garantir a entrega dos dados no destino (HUNT, 2002). Esta adição de informações que ocorre em cada camada é chamada de encapsulamento, como retrata Figura 11:

⁴ *Driver* (de dispositivo): é um conjunto de rotinas que permitem ao sistema operacional acessar o periférico. Disponível em: <<http://wiki.softwarelivre.org/bin/view/PCLivre/Glossario>>. Acesso em 17 jul. 2011.

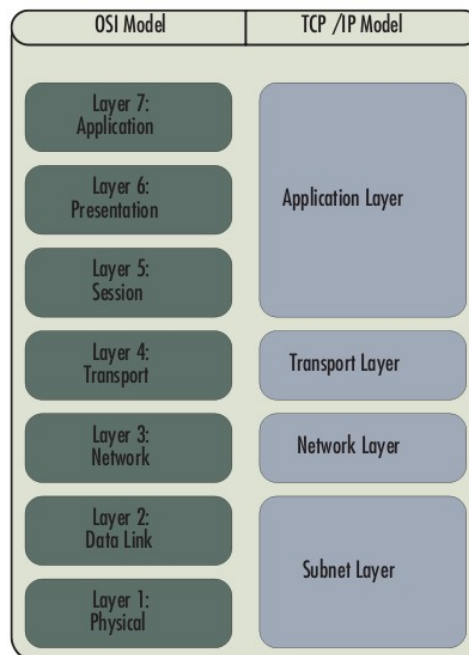
Figura 11 - Encapsulamento de dados



Fonte: Hunt (2002, p. 22).

A Figura 12 traça comparativo entre os dois modelos, conforme a maioria dos autores os trata, porém, é importante ficar claro que esses modelos não são compatíveis.

Figura 12 - Os modelos OSI e TCP/IP



Fonte: Noonan e Dubrawsky (2006, p. 46).

Após uma conceitualização inicial, o próximo capítulo apresenta a fundamentação teórica tomada como base para realização do presente trabalho, no mesmo será apresentado tópicos referente a demanda de energia elétrica, métodos de tarifação, estrutura tarifária, classificação dos consumidores, horários fora de ponta e de ponta, períodos seco e úmido, ultrapassagem de demanda, controlador de demanda, funcionamento do controlador e métodos de controle.

3 ENERGIA ELÉTRICA

Segundo Haddad (2004), a eletricidade, dentro das ciências naturais, ocupa uma posição especial considerando-se que, durante um longo período, esta forma de energia era de uma natureza completamente além da compreensão humana. Perto de 600 AC, Tales de Mileto, um dos sete sábios da Grécia, observou que ao se esfregar o âmbar (petrificação transparente, marrom-amarelada, da resina de árvores coníferas mortas) este passava a atrair corpos leves como, por exemplo, palhas, “pedacinhos” de tecido ou de poeira, largando-os em seguida com igual espontaneidade. O fenômeno foi chamado de eletricidade, da palavra grega que significa âmbar (élektron).

A eletricidade é uma forma de energia que pode ser imediata e eficientemente transformada em qualquer outra, tal como em energia térmica, luminosa, mecânica, química, etc. Ela pode ser produzida nas mais favoráveis situações como, por exemplo, junto a quedas de água, nas quais a energia hidráulica está disponível, perto de minas carboníferas ou de refinarias, onde o carvão ou o óleo pode ser utilizado de pronto, ou perto dos centros consumidores para onde o combustível pode ser economicamente transportado, e de forma eólica partir da energia cinética do vento (massas de ar em movimento) e do aquecimento eletromagnético do sol (energia solar), (LINHARES, 2015).

A energia elétrica é composta por suas grandezas fundamentais básicas, entres elas, pode-se citar a corrente elétrica, tensão e potência elétrica.

Conforme Procel (2009), corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas em um condutor sujeito a uma diferença de potencial elétrico. Por convenção, o sentido desta corrente é determinado pelo movimento das cargas positivas no interior do condutor, sendo naturalmente do ponto de maior para o de menor potencial, muito embora o sentido real seja dado pelos elétrons livres que fluem do ponto de menor potencial ao pólo de maior potencial. A Equação 1 apresenta o cálculo da intensidade de corrente elétrica.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Onde:

I – intensidade de corrente elétrica.

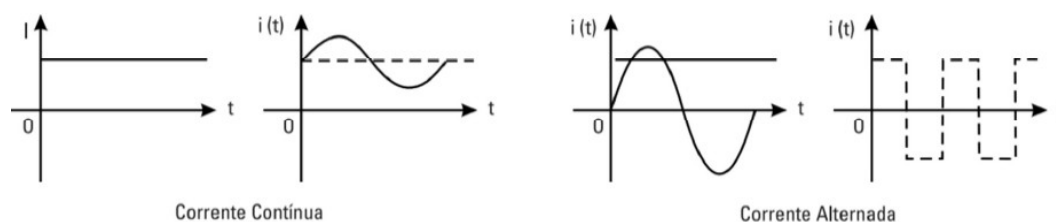
dq – variação da quantidade de carga elétrica em Coulomb.

dt – variação do tempo em segundos.

A unidade fundamental de medida de intensidade de corrente elétrica no Sistema Internacional de Medidas é o ampere (A). A corrente pode se apresentar de duas formas

distintas, uma delas é a corrente alternada a qual se altera na direção do fluxo, ou seja, varia sua polaridade no tempo obrigatoriamente passando por um valor igual a zero, enquanto a corrente contínua passa em apenas uma direção todo o tempo, permanece constante e possui pólos positivo e negativo definidos. Na Figura 13, são apresentados exemplos de ondas de corrente contínua e alternada (LINHARES, 2015).

Figura 13 - Onda corrente contínua e alternada



Fonte: Haddad (2004, p. 19).

Por sua vez, o fluxo da corrente elétrica em um circuito se dá pela diferença de potencial, que também é chamada de tensão existente entre um ponto inicial e final do condutor ou elementos do circuito. Este movimento, é sempre acompanhado de fenômenos energéticos tais como, desprendimento de calor, transformação de energia elétrica em mecânica ou vice-versa, transformação de energia elétrica em energia luminosa, transformação de energia elétrica em energia magnética (HADDAD, 2004). No Sistema Internacional de Medidas a unidade da tensão elétrica é o volt (V).

Sendo que a diferença de potencial (V) entre dois pontos relaciona a quantidade de energia necessária para transportar uma quantidade de carga elétrica entre estes dois pontos. A potência elétrica (P) desenvolvida para realizar este trabalho é dada pelo quociente entre o trabalho realizado e o correspondente intervalo de tempo. A equação 2 apresenta o cálculo da potência elétrica. A unidade de potência no Sistema Internacional de Medidas é denominada watt (W).

$$P = \frac{dw}{dt}$$

Onde:

P - potência elétrica.

dW – energia elétrica.

dt – variação do tempo.

A potência também pode ser encontrada a partir do produto da tensão pela corrente. Medições de energia são efetuadas a partir da potência medida num intervalo de tempo, em

geral, esse intervalo de tempo é de uma hora. Existem três tipos de potência elétrica, e estas formam o triângulo das potências, sendo elas:

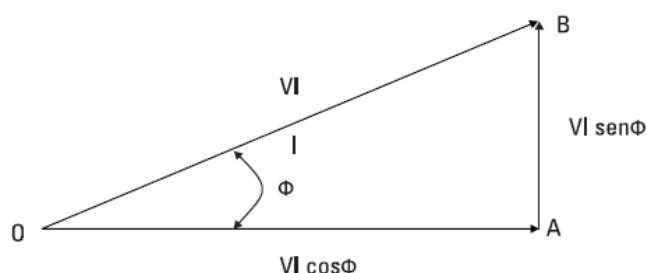
a) Potência Ativa: quantidade de energia elétrica solicitada por unidade de tempo, expressa em quilowatts (kW) (ANEEL, 2010).

b) Potência Reativa: definida como a raiz quadrada da diferença dos quadrados da potência aparente e da potência ativa, expressa em voltampères eativos (VAR) e seus múltiplos (ANEEL, 2010). É a energia elétrica responsável pela criação dos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, porém não produz trabalho (HADDAD, 2004).

c) Potência Aparente: corresponde à soma fasorial das potências ativa e reativa, é expressa em volt-ampère (VA).

O triângulo das potências é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Triângulos das potências



Fonte: Haddad (2004, p. 30).

A potência ativa (P) e a reativa (Q) podem ser representadas geometricamente em um triângulo retângulo, onde o cateto OA representa a potência ativa (P) e o cateto AB a potência reativa (Q). A hipotenusa OB é igual a VI e recebe a denominação de potência aparente (HADDAD, 2004).

3.1 Medidores de Energia Elétrica

Por definição física, a potência elétrica, medida em Watts, é igual ao produto entre a diferença de potencial, em Volts, e a corrente elétrica circulante através do dispositivo, em Ampères (KLEPA; PEREIRA, 2013).

Desse modo, para medir a potência elétrica de um determinado dispositivo, emprega-se um instrumento capaz de indicar o produto entre a tensão e a corrente no sistema a ser medido. E, dependendo da forma como esse produto é feito, pode-se obter a indicação de potência ativa, reativa ou aparente. Em circuitos de corrente alternada a característica reativa

de certos componentes pode produzir potências de caráter complexo, exigindo que o sistema de medição seja capaz de medir separadamente as parcelas de potência ativa e potência reativa. (ANDREOLI, 2005).

Por essa razão, os medidores de potência que operam em corrente alternada possuem uma construção e um princípio de operação capaz de realizar a separação vetorial da potência real, indicada como potência ativa, e da potência imaginária, indicada como potência reativa. Para medição de potência ativa deve-se considerar apenas a componente real da potência aparente, para isso utiliza-se a seguinte equação (NUNES, 2012):

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Já a potência reativa é definida pela equação:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$$

Ainda segundo Nunes (2012), em termos matemáticos, a energia elétrica consumida, ou simplesmente o consumo, pode ser medido através da integração da potência exigida pela unidade de consumo em um intervalo de tempo. A equação matemática que determina o consumo de energia elétrica de um circuito em um intervalo de tempo $\Delta t = (t_2 - t_1)$ é:

$$E(\Delta t) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$

Onde p é a potência instantânea.

Medidores de energia elétrica operam através da medição da tensão e corrente instantâneas, e através de seu produto determina a potência instantânea (em Watts) do circuito. A integração da potência medida ao longo do tempo fornece então a Energia Consumida, que é medida em Joules, watts-hora ou seus derivados. Em aplicações comerciais, a unidade empregada é o kWh (Quilowatt-hora), energia equivalente a 3.600.000 Joules, que corresponde a uma carga de 1kW ligada durante 1 hora (NUNES, 2012).

3.1.1 Medidores Eletrônicos Energia Elétrica

Medidores eletrônicos de energia são instrumentos que empregam em sua operação, circuitos eletrônicos para a medição da potência elétrica. A forma para a apresentação do valor medido pode ser eletrônico, quando emprega mostradores de cristal líquido ou eletromecânico, quando o circuito medidor fornece a saída em forma de pulsos destinados ao

acionamento de contadores eletromecânicos de pulsos ou motores de passo acoplados a contadores mecânicos (ANDREOLI, 2005).

A maioria dos medidores de energia eletrônicos incorpora outras funções além da principal, como a possibilidade de comunicação com dispositivos externos, a capacidade de armazenamento das leituras em memória interna, a medição de energia reativa e de demanda incorporadas e recursos para a aplicação de tarifas horo-sazonais. Isto leva à utilização destes medidores como elemento sensor de sistemas de gerenciamento de energia ao mesmo tempo, em que operam como registradores de consumo para o faturamento pela concessionária. Com a intensificação de uso dos medidores eletrônicos de energia, maiores serão as aplicações para as funcionalidades oferecidas por estes equipamentos em todos os segmentos de consumo, tornando-os a alternativa mais econômica em termos de equipamentos destinados ao gerenciamento de energia (SCHWENDTNER, 1996).

3.1.2 Princípios de operação

Os medidores eletrônicos de energia são baseados em circuitos conversores analógico-digitais e em processadores digitais de sinal capazes de realizar a amostragem das tensões e correntes do sistema de alimentação e convertê-las em valores proporcionais à potência do sistema medido. Circuitos eletrônicos destinados ao processamento digital de sinais possuem melhor desempenho que os circuitos analógicos nas aplicações de medição de energia, apresentando melhor estabilidade, facilidade de composição por elementos programáveis, facilidade na calibração e custo com forte tendência à redução em virtude das novas técnicas de integração disponíveis (COLLINS, 1999).

Medidores eletrônicos de energia operam a partir de transdutores convencionais (resistências de derivação, transformadores de corrente) ou a partir de transdutores de efeito Hall, podendo medir potência em circuitos de corrente alternada e de corrente contínua. Pode-se utilizar diversas técnicas para se obter a multiplicação dos valores de tensão e corrente para a determinação da potência do circuito, que integrada fornece a energia consumida. Entre estas técnicas estão a multiplicação digital, multiplicadores de efeito Hall e multiplicadores por divisão de tempo (ANDREOLI, 2005).

3.1.3 Transformadores

Dispositivo que realiza a adequação do valor de grandeza elétrica medida à faixa de operação do instrumento de medição, ou seja, fornece uma grandeza de saída que tem uma

correlação determinada com a grandeza de entrada. Quando utilizados em processos de medição, devem possuir precisão compatível com a medição que se deseja, em sua seleção deve-se seguir alguns parâmetros como sensibilidade, precisão, limite de utilização, robustez, etc. Dentre os mais comuns estão o resistivo, capacitivo, indutivo, de corrente ou tensão, calor, entre outros (KLEPA; PEREIRA, 2013). Os transformadores mais comuns empregados em sistemas de medição de grandezas elétricas são:

1. **Transformador de Corrente:** Utilizados exclusivamente para medidas de corrente alternada, transforma um sinal de corrente em 4 a 20mA ou 0 a 10V. Estes componentes operam baseados na relação de correntes em função da relação de espiras de um transformador. É um equipamento que tem seu enrolamento primário ligado em série com o circuito medido e seu secundário ligado aos equipamentos de medição. Sua forma construtiva permite a operação em região linear para toda a faixa de operação, mas o componente pode apresentar considerável distorção no sinal de saída caso a corrente medida apresente alguma componente contínua, por saturação do seu núcleo. Além da susceptibilidade à saturação, o Transformador de Corrente (ou TC, como é conhecido) apresenta um pequeno deslocamento na fase do sinal de saída em relação ao sinal de entrada. A escolha do material e dimensões do transformador de corrente depende de fatores tais como a intensidade do sinal, a indutância desejada e também a frequência do sinal que deve ser trabalhado (BELCHIOR, 2014).
2. **Transformador de Potência:** É um equipamento destinado a transformar as tensões primárias, geralmente altas, para valores secundários, apropriados para o uso dos medidores de energia elétrica. Consiste geralmente de um enrolamento primário e um enrolamento secundário, seu enrolamento secundário é conectado às bobinas de potencial dos medidores, enquanto sua bobina primária é ligada em paralelo ao circuito que se deseja medir a tensão. Possuem relação de transformação conhecida e operam na região linear em toda sua faixa de aplicação, de igual forma como os transformadores de corrente, estão sujeitos a saturação e consequente distorção caso a tensão de entrada possua alguma componente contínua (BELCHIOR, 2014).
3. **Transformador de Corrente de Efeito Hall:** Sensores que atuam baseados no princípio do efeito Hall, basicamente fornecem uma tensão devido à interação de um campo magnético e uma corrente elétrica. A tensão gerada é de valor muito baixo, sendo assim, necessita de um circuito eletrônico de modo a condicionar o sinal para valores facilmente mensuráveis (HONEYWELL, 2015). Possuem as vantagens de permitir a isolamento galvânica entre os sinais de entrada e saída, possuir pequenas

dimensões e peso, permitem a quantificação das componentes contínua e alternada de um sinal de corrente, além de não serem prejudicados por saturação magnética. Seu emprego vem se difundindo a cada dia, com a crescente queda no valor deste componente (ANDREOLI, 2005).

4. **Transformador de Tensão de Efeito Hall:** Uma aplicação de transdutores de corrente de baixo sinal permite a medição da tensão pelos mesmos princípios. Os níveis de tensão são convertidos em correntes por redes resistivas de precisão, e o resultado é um componente de elevada precisão que proporciona as mesmas vantagens de aplicação dos Transdutores de Corrente de Efeito Hall: Pequeno volume e peso, grande linearidade, imunidade à saturação, aplicação em corrente contínua ou alternada e grande faixa de alcances (ANDREOLI, 2005).

3.1.4 Precisão

Medidores eletrônicos de energia são construídos normalmente na classe 0,8 (classe de exatidão do medidor de energia), podendo em casos de instrumentação científica alcançar a precisões na faixa de 50ppm (partes por milhão). A facilidade em se obter instrumentos de precisão mais elevada decorre principalmente do fato de inexistir limitações mecânicas nos elementos envolvidos no processo de medição e registro, e também à possibilidade de se empregar sensores de maior precisão e alcance dinâmico (COLLINS, 1999).

3.1.5 Limitações

O emprego de circuitos e dispositivos baseados em semicondutores nos remete à sensibilidade destes componentes a surtos de tensão eventualmente presentes no sistema de distribuição. Especial cuidado deve então ser tomado durante o projeto destes instrumentos para que estes eventos espúrios não comprometam o correto funcionamento dos componentes sensíveis, preservando a confiabilidade e precisão do equipamento de medida (ANDREOLI, 2005).

Outra limitação eventualmente presente neste medidor é a ausência de indicação durante a interrupção de alimentação. Salvo casos de medidores eletrônicos que acionam contadores ciclométricos mecânicos, a indicação destes aparelhos depende de fonte de alimentação obtida na própria tensão do sistema de distribuição (NUNES, 2012).

3.2 Conexões dos medidores de energia

Segundo Andreoli (2005) a medição resume-se à quantificação do total de energia fornecida em cada fase do sistema de alimentação. Deste modo, os instrumentos devem ser conectados ao sistema de forma a serem capazes de computar a energia total envolvida. O esquema utilizado dependerá do instrumento e da configuração do sistema de distribuição (número de fases e tipo de ligação). Ainda segundo o autor, conforme o nível de potência envolvido na instalação, o instrumento de medição pode ser conectado ao sistema de forma direta, quando os sinais principais de corrente e tensão percorrem o interior do instrumento, ou indireta, quando a conexão é realizada através de transdutores das grandezas envolvidas.

3.2.1 Medição Direta

Medições diretas caracterizam-se pela conexão do medidor diretamente ao circuito onde será efetuada a medição, isto significa que a corrente drenada pelo circuito circulará integralmente pela bobina de corrente do medidor, enquanto a bobina de tensão é ligada diretamente em paralelo com o circuito. É utilizada principalmente em circuitos de baixa potência, sendo sua limitação imposta principalmente pela corrente máxima admissível pelo medidor. Esta medição é utilizada principalmente nos consumidores do Grupo B, ou seja, nos consumidores são atendidos em tensão secundária de distribuição (FILHO, 1997).

Possui como vantagens a simplicidade de aplicação, pois dispensa o emprego de transdutores, e a precisão, que é limitada apenas pelas características construtivas do medidor, não sendo influenciada por componentes externos (BELCHIOR, 2014).

As desvantagens desta medição são a limitação de corrente máxima existente em virtude da forma construtiva do instrumento, e a necessidade de se instalar o equipamento junto ao alimentador principal, reduzindo a flexibilidade de utilização do sistema de medição (BELCHIOR, 2014).

3.2.2 Medição Indireta

A medição de elevados níveis de tensão, corrente ou potência de forma direta, ou seja, através da manipulação direta da grandeza medida, encontra limitações nas características construtivas dos instrumentos de medição. Para contornar esta dificuldade, emprega-se com frequência transdutores, que são dispositivos capazes de converter um nível da grandeza a ser medida em outro nível, capaz de ser manipulado pelo instrumento de medida, e com a introdução da menor distorção possível (ANDREOLI, 2005).

3.3 Métodos de Tarifação

Para compreensão dos assuntos tratados neste trabalho, é necessário conhecer alguns conceitos e definições, além do perfeito conhecimento da sistemática de tarifação:

a) Potência: é a capacidade de consumo de um equipamento elétrico, expressa em Watts (W) ou quilowatts (kW).

b) Energia: é a quantidade de eletricidade utilizada por um aparelho elétrico ao ficar ligado por um determinado tempo. Tem como unidades mais usuais o quilowatt-hora (kWh) ou megawatt-hora (Mwh).

A tarifa de energia elétrica é a composição de valores calculados que representam cada parcela dos investimentos e operações técnicas realizadas pelos agentes da cadeia de produção e da estrutura necessária para que a energia possa ser utilizada pelo consumidor. A tarifa representa, portanto, a soma de todos os componentes do processo industrial de geração, transporte (transmissão e distribuição) e comercialização de energia elétrica. São acrescidos ainda os encargos direcionados ao custeio da aplicação de políticas públicas. Os impostos e encargos estão relacionados na conta de luz.

As empresas concessionárias fornecem energia elétrica a seus consumidores, com base em obrigações e direitos estabelecidos em um contrato de concessão, celebrado com a União, para a exploração do serviço público de distribuição de energia elétrica em sua área de concessão. No momento da assinatura do contrato, a empresa concessionária reconhece que o nível tarifário vigente, ou seja, as tarifas definidas na estrutura tarifária da empresa, em conjunto com os mecanismos de reajuste e revisão das tarifas estabelecidas nesse contrato, são suficientes para a manutenção do seu equilíbrio econômico-financeiro (ANEEL, 2019).

Métodos de tarifação se referem à forma que os consumidores são classificados para a cobrança do seu consumo de energia elétrica. Para o mesmo, deve-se observar a estrutura tarifária e grupos de consumidores (PROCEL, 2011).

3.4 Estrutura Tarifária

A estrutura tarifária é um conjunto de tarifas (lista de preços) aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, de acordo com a modalidade de fornecimento. Busca refletir as diferenças de custos relacionados ao fornecimento de energia a cada tipo de consumidor. A partir de então, define-se a relatividade dos preços. A estrutura compreende a diferenciação das tarifas, segundo os componentes de

consumo e demanda, nível de tensão de fornecimento, classe de consumo, estação do ano, período do dia, localização do consumidor, etc. (BITU; BORN, 1993).

As tarifas de energia elétrica não têm um mesmo valor para todos os consumidores. Elas se diferenciam entre grupos tarifários, de acordo com a tensão de fornecimento, o momento do consumo, o tipo de tarifa e a classe do consumidor. As mesmas podem ser estruturadas e diferenciadas de muitas formas (VIEIRA, 2016).

Teoricamente, poderia ser definida uma tarifa para cada consumidor, porém, dificuldades de diversas naturezas como, por exemplo, as restrições de comercialização, sistema de medição e cobrança, limitam o grau de aprimoramento da estrutura tarifária.

O consumidor paga um preço final que inclui, além das tarifas, as taxas ou encargos, as contribuições e os impostos que são tributos, ou seja, pagamentos obrigatórios que não representam uma punição por ato ilícito e que devem ser previstos em lei (FUGIMOTO, 2010).

As taxas ou encargos independem da quantidade consumida de energia e estão relacionadas com as despesas de atendimento as unidades de consumo. Estão relacionadas aos custos associados ao atendimento dos consumidores, diretamente às unidades de consumo. Existem taxas especiais como aquelas relacionadas com o consumo adicional de combustíveis nas usinas térmicas. As taxas permitem repassar rapidamente ao consumidor aumento imprevistos nos custos. O preço final de fornecimento pago pelo cliente é a composição da tarifa, contribuições, taxas, com impostos como o ICMS (FUGIMOTO, 2010).

3.5 Classificação dos Consumidores

Para fins de faturamento, as unidades consumidoras são agrupadas em dois grupos tarifários, definidos, principalmente, em função da tensão de fornecimento e também, como consequência, em função da demanda. Se a concessionária fornece energia em tensão inferior a 2300 Volts, o consumidor é classificado como sendo do “Grupo B” (baixa tensão); se a tensão de fornecimento for maior ou igual a 2300 Volts, será o consumidor do “Grupo A” (alta tensão). Estes grupos foram assim definidos:

3.5.1 Consumidores do Grupo A

Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo, em caráter opcional, nos termos definidos

na Resolução ANEEL n 456, caracterizado pela estruturação tarifária binômia e subdividido nos subgrupos A1, A2, A3, A3a, A4 e AS. A tabela 1 apresenta estes subgrupos.

Tabela 3 - Divisão do grupo A em seus subgrupos.

Subgrupos	Tensão
A1	tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV
A2	tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV
A3	tensão de fornecimento de 69 kV
A3a	tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV
A4	tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV
AS	tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição e enquadradas neste Grupo em caráter opcional.

Fonte: Do autor.

Os consumidores deste grupo são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. Esses consumidores podem enquadrar-se em uma das duas alternativas tarifárias:

- Tarificação convencional;
- Tarificação horo-sazonal.

3.5.1.1 Tarificação Convencional

O enquadramento na tarifa convencional exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua um único valor da demanda pretendida pelo consumidor (demanda contratada), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco ou úmido).

Os consumidores do Grupo A, subgrupos A3a, A4 ou AS, podem ser enquadrados na tarifa convencional quando a demanda contratada for inferior a 300 kW, desde que não tenham ocorrido, nos 11 meses anteriores, 3 (três) registros consecutivos ou 6 (seis) registros alternados de demanda superior a 300 kW.

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. A parcela de consumo é calculada multiplicando-se o consumo medido pela tarifa de consumo.

A parcela de demanda é calculada multiplicando-se a tarifa de demanda pela demanda contratada ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em 10% a demanda contratada.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa em mais de 10% a demanda contratada. É calculada multiplicando-se a tarifa de ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a demanda contratada (BRASIL, 2000).

3.5.1.2 Tarifação Horo-Sazonal

Essa modalidade é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

A estrutura de tarifação horo-sazonal pode ser aplicada, segundo os seguintes modelos de tarifação:

a) Tarifa Verde

O enquadramento na tarifa Verde dos consumidores do Grupo A. Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua a demanda pretendida pelo consumidor (demanda contratada), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta). Embora não seja explícita, a Resolução 414 de 2010 da Aneel permite que sejam contratados dois valores diferentes de demanda, um para o período seco e outro para o período úmido (BRASIL, 2010). A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem.

A parcela de demanda é calculada multiplicando-se a tarifa de demanda pela demanda contratada ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em mais de 10% a demanda contratada. A tarifa de demanda é única, independente da hora do dia ou período do ano.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa em mais de 10% a demanda contratada. É calculada multiplicando-se a tarifa de ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a demanda contratada.

b) Tarifa Horo-sazonal Azul

O enquadramento dos consumidores do Grupo A na tarifação horosazonal azul é obrigatório para os consumidores dos subgrupos A1, A2 ou A3. Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se pactua tanto o valor da demanda pretendida pela consumidora no horário de ponta (demanda contratada na ponta) quanto o valor pretendido nas horas fora de ponta (demanda contratada fora de ponta). Embora não seja explícita, assim como na tarifa verde, a resolução 414 permite que sejam contratados valores diferentes para o período seco e para o período úmido (BRASIL, 2010).

A fatura de energia elétrica desses consumidores é composta pela soma de parcelas referentes ao consumo e demanda e, caso exista, ultrapassagem. Em todas as parcelas observa-se a diferenciação entre horas de ponta e horas fora de ponta (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2011).

A parcela de demanda é calculada somando-se o produto da tarifa de demanda na ponta pela demanda contratada na ponta (ou pela demanda medida na ponta, de acordo com as tolerâncias de ultrapassagem) ao produto da tarifa de demanda fora da ponta pela demanda contratada fora de ponta (ou pela demanda medida fora de ponta, de acordo com as tolerâncias de ultrapassagem).

As tarifas de demanda não são diferenciadas por período do ano. A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa a demanda contratada acima dos limites de tolerância de 5% para os sub-grupos A1, A2 e A3 e 10% para os demais sub-grupos. O valor desta parcela é obtido multiplicando-se a tarifa de ultrapassagem pelo valor da demanda medida que supera a demanda contratada (PROCEL, 2011).

3.5.2 Consumidores do Grupo B

As unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV, ou ainda unidades atendidas em tensão superior a 2,3 kV e faturadas neste grupo, são caracterizadas pela estruturação tarifária monômnia (ANEEL, 2000).

Consumidor do grupo B é aquele que recebe energia elétrica na tensão entre 220 e 380 V e tem com a concessionária de energia um contrato de adesão. Contrato de adesão é um instrumento contratual, com cláusulas vinculadas às normas e regulamentos aprovados pela ANEEL, não podendo o conteúdo das mesmas ser modificado pela concessionária ou consumidor, a ser aceito ou rejeitado de forma integral (ANEEL, 2000).

Os consumidores do Grupo B (baixa tensão < 2.300 Volts) são classificados em:

- a) B1 – residencial;
- b) B2 – rural;
- c) B3 - demais classes;
- d) B4 - iluminação pública.

Os consumidores de baixa tensão (Grupo B) são classificados ainda de acordo com o número de fases. São três os tipos de fornecimento, conforme o número de fases:

- a) Tipo A – monofásico – dois condutores (uma fase e o neutro);
- b) Tipo B – bifásico – três condutores (duas fases e o neutro); e

c) Tipo C – trifásico – quatro condutores (três fases e o neutro).

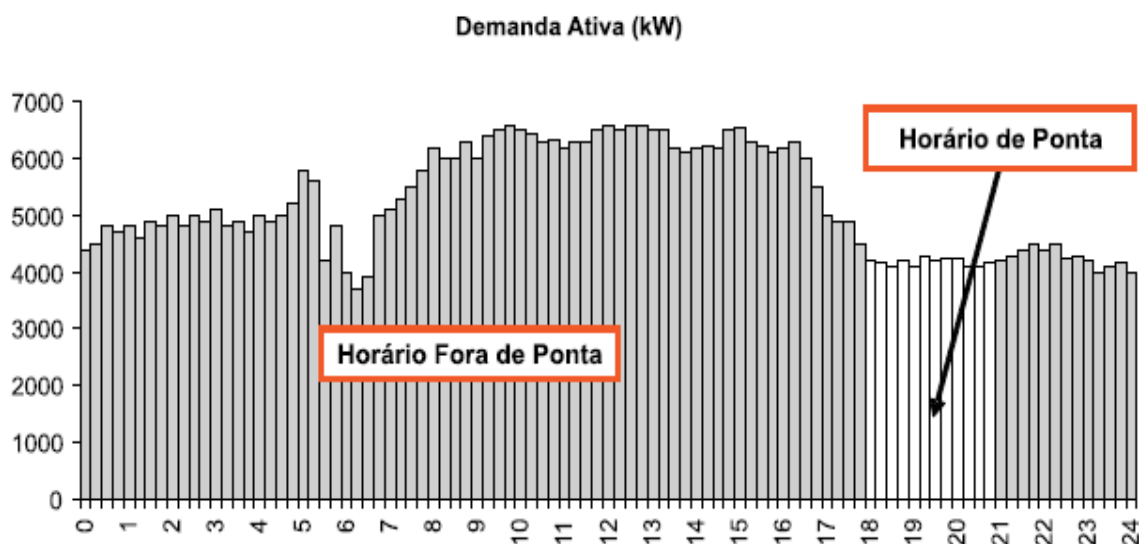
Para determinação destes, deverá ser calculada a carga instalada de cada unidade consumidora. Essa carga será o somatório das potências nominais de placa dos aparelhos elétricos e das potências de iluminação declaradas. Quando houver cargas de motores, deverão ser computadas as suas respectivas quantidades e potências individuais (PROCEL, 2011).

Nos consumidores enquadrados no Grupo B, apenas o consumo de energia é faturado, não existindo cobrança relativa à demanda de potência (PROCEL, 2011).

3.6 Horários Fora de Ponta e de Ponta

O horário de ponta (P) é o período definido pela distribuidora e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, “Corpus Christi”, e oito dias de feriados conforme descrito na resolução ANEEL 414, considerando a curva de carga do seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão. O horário fora de ponta (F) é o período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta (VIANA; BORTONI; NOGUEIRA, 2012).

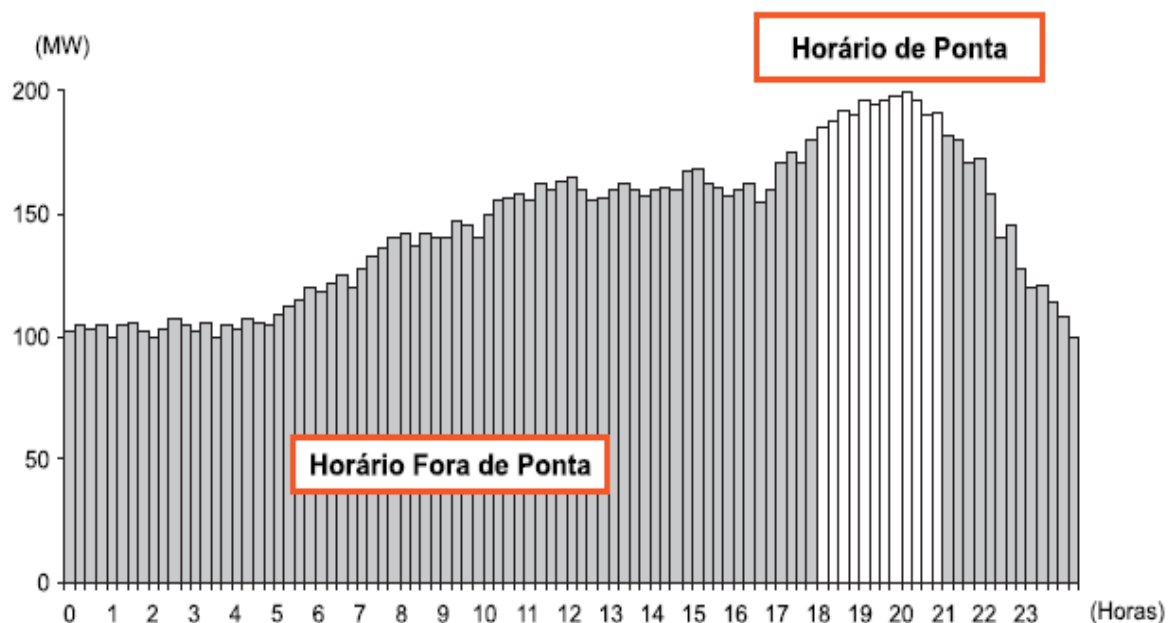
Figura 15 - Horários de ponta e fora de ponta para uma unidade consumidora



Fonte: Do autor com base em Viana, Bortoni e Nogueira (2012).

Ainda segundo Viana, Bortoni e Nogueira (2012), estes horários são definidos pela concessionária em virtude, principalmente, da capacidade de fornecimento que a mesma apresenta. A curva de fornecimento de energia típica de uma concessionária pode ser vista através da Figura 16, onde o maior valor de demanda ocorre geralmente no horário de ponta.

Figura 16 - Curva típica de fornecimento de potência de uma concessionária



Fonte: Do autor com base em Viana, Bortoni e Nogueira (2012).

3.7 Períodos seco e úmido

Estes períodos guardam, normalmente, uma relação direta com os períodos onde ocorrem as variações de cheias dos reservatórios de água utilizados para a geração de energia elétrica. O período Seco corresponde ao período de 07 (sete) ciclos de faturamento consecutivos iniciando-se em maio e finalizando-se em novembro de cada ano; é, geralmente, o período com pouca chuva. O período Úmido corresponde ao período de 05 (cinco) ciclos de faturamento consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte; é, geralmente, o período com mais chuva (CARVALHO, 2011).

3.8 Demanda de energia elétrica

Conforme a Resolução 456 da ANEEL no Art. 2º, § VIII, demanda é a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado. Assim, esta potência média, expressa em quilowatts (kW) e quilovolt-ampère-reactivo (kvar), respectivamente. Pode ser calculada, por exemplo, dividindo-se a energia elétrica absorvida pela carga em um certo intervalo de tempo Δt , por este intervalo de tempo Δt , podendo ser expressada pela equação abaixo.

$$D = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt$$

No Brasil o intervalo de tempo (período de integração) é de 15 minutos, portanto, em um mês teremos: 30 dias x 24 horas / 15 minutos = 2880 intervalos (ANEEL, 2019).

Segundo Suppa e Terada (2010), temos os métodos de medição síncrona e assíncrona. O método de medição síncrona é aquele utilizado por todas as concessionárias brasileiras e pela maioria dos países, medindo a energia ativa num determinado intervalo de tempo que pode variar de 15 à 60 minutos na maioria dos casos.

Na prática, o que se faz é integrar os pulsos de energia dentro deste intervalo, por isso chamado de intervalo de integração, obtendo o que chamamos de demanda de energia ativa, ou seja, a demanda é a energia média consumida em cada intervalo de 15 minutos não existindo plenamente antes do fechamento do intervalo.

Geralmente a concessionária fatura pelos maiores valores registrados nos períodos de fora-ponta e ponta ou pelos valores contratados, os que forem maiores. A cada início do intervalo de integração o consumo é zerado dando início a uma nova contagem. Se ao final do intervalo o valor médio de fechamento for superior ao limite permitido o usuário arcará com pesadas multas por ultrapassagem.

Ainda conforme resolução são adotadas algumas definições entre a distribuidora e o consumidor por meio de contrato de prestação de serviço, sendo eles (ANEEL, 2019):

a) Demanda: média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado.

b) Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW);

c) Demanda de ultrapassagem: parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em quilowatts (kW);

d) Demanda medida: maior demanda de potência ativa verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 (quinze) minutos expressa em quilowatts (kW);

e) Demanda faturável: valor da demanda de potência ativa identificada de acordo com os critérios estabelecidos e considerados para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts (kW).

Para o faturamento do consumo, acumula-se o total de kWh consumidos durante o período: fora de ponta seca ou fora de ponta úmida, e ponta seca ou ponta úmida. Para cada um desses períodos, aplica-se uma tarifa de consumo diferenciada, e o total é a parcela de faturamento de consumo. Evidentemente, as tarifas de consumo nos períodos secos são mais elevadas que nos períodos úmidos, e no horário de ponta é mais cara que no horário fora de ponta (PROCEL, 2011).

A cobrança é sempre em função da demanda contratada e do consumo. Quando se contrata uma demanda, na verdade, se está solicitando que a empresa fornecedora disponibilize uma determinada quantidade de energia para ser consumida. Dessa maneira, poderão ocorrer três casos de cobrança (PROCEL, 2011):

a) Demanda registrada inferior à demanda contratada: aplica-se a tarifa de consumo e demanda correspondente ao valor contratado;

b) Demanda registrada superior à demanda contratada, mas dentro da tolerância de ultrapassagem: aplica-se a tarifa de consumo e de demanda correspondente à demanda registrada;

c) Demanda registrada superior à demanda contratada e acima da tolerância: aplica-se a tarifa consumo e de demanda correspondente à demanda contratada, e soma-se a isso a aplicação da tarifa de ultrapassagem, correspondente à diferença entre a demanda registrada e a demanda contratada. Ou seja, paga-se tarifa normal pelo contratado, e tarifa de ultrapassagem sobre todo o excedente.

3.9 Ultrapassagem da Demanda

De acordo a Aneel (2018), a demanda de energia é contratada junto à concessionária (paga-se por ela independente do uso). A monitoração da demanda é realizada pela média dos 15 minutos de integração. Sua medição é realizada com base na “média” dos 15 minutos de integração de demanda. A ultrapassagem de demanda elétrica é controlada com base nos valores médios da integração de 15 minutos, ou seja, a demanda média de 15 minutos não pode ultrapassar a demanda contratada. Caso ocorra a ultrapassagem, a concessionária cobrará a multa com base no maior valor registrado. De acordo com o tipo de consumidor, existe uma

tolerância sobre o valor de demanda contratada para que não haja cobrança de multas, conforme definido na Resolução 456 de 29 de novembro de 2000, Art. 2º, § VIII:

5%, para as unidades cuja tensão de fornecimento seja maior ou igual a 69 kV (tarifa-azul);

10%, para as unidades cuja tensão de fornecimento seja menor que 69 kV e no mês de faturamento, a demanda para fora de ponta (tarifa azul) e a demanda (tarifa verde), sejam superiores a 100 kW;

20%, para as unidades atendidas com tensão inferior a 69 kV, e no mês de faturamento, a demanda fora de ponta (tarifa azul) e demanda (tarifa verde) de 50 a 100 kW.

3.10 Controle de demanda

Segundo F.S Ozur (2011), O controlador de demanda é um equipamento eletrônico que tem como função principal manter a demanda de energia ativa de uma unidade consumidora, dentro de valores limites pré-determinados, atuando, se necessário, sobre alguns dos equipamentos (cargas) da instalação e segundo as regras de faturamento vigentes. A maior parte dos Controladores de Demanda controla também o fator de potência e o consumo de energia. Controlar a demanda é fundamental, não só para o consumidor diminuir seus custos com energia elétrica, mas também para a concessionária que necessita operar de forma bem dimensionada evitando interrupções ou má qualidade de fornecimento.

Os controladores de demanda podem ser divididos em dois grupos: convencionais e inteligentes.

Convencionais:

Atuam de forma prematura ou intermitente dentro do intervalo de integração (deslocamento dos pulsos elétricos) utilizando medição por média móvel e controle por níveis (on/off) ou ainda por controle de projeção simples. Dessa forma, pode retirar uma carga mesmo que ela não interfira diretamente na ultrapassagem do valor que corresponde à demanda, tendo que ser bem programado para evitar atuação desconforme (VIEIRA, 2016).

Inteligentes:

Atuam de modo mais refinado, dando margem à demanda para que essa naturalmente caia, postergando ao máximo sua influência no controle sobre a mesma. Utilizam método de medição preditivo mais elaborado, portanto são mais confiáveis e eficientes (VIEIRA, 2016).

3.11 Funcionamento

Um controlador de demanda necessita medir corretamente para poder controlar. A informação para controle deverá vir do medidor de energia cedido pela concessionária: são os sinais de controle além das variáveis a serem controladas; liberadas pela concessionária através de solicitação padrão.

Logo, o controlador de demanda deverá estar conectado ao medidor recebendo as mesmas informações da concessionária e baseado nessas, realizar suas ações sobre as cargas passíveis de serem controladas. Uma vez recebido os sinais da concessionária o controlador de demanda passará a verificar, dentro de cada período de integração (quase 3000 intervalos/mês), a necessidade de se retirar ou não alguma carga elétrica da instalação, a fim de que a demanda global se mantenha, dentro do intervalo, abaixo dos limites de controle pré-estabelecidos (ANDREOLI, 2012).

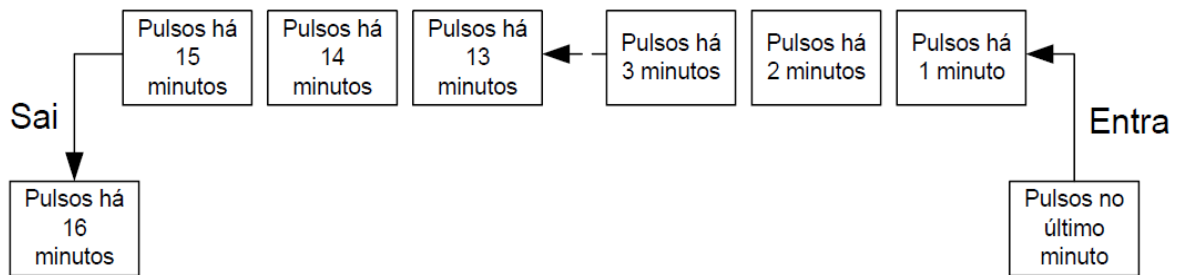
3.12 Métodos de controle

O método de controle do controlador de demanda define a estratégia que este irá utilizar para monitorar e controlar a demanda. É, portanto, sua componente mais importante, afinal é o método de controle quem determina a maior ou menor precisão do controlador. Os métodos de controle podem ser: janela móvel, retas de cargas ou retas inclinadas e preditivo adaptativo (SALLES, 2012).

3.12.1 Método janela móvel

Segundo Suppa e Terada (2012), o chamado algoritmo de Janela Móvel, inventado no final da década de 70, para uso nos primeiros controladores micro processados, nada mais é que um processamento first-in first-out (o primeiro que entra é o primeiro que sai), onde a janela de 15 minutos é dividida em compartimentos. Em cada compartimento é armazenado o total de pulsos de energia contados no correspondente período de tempo. Para exemplificar facilmente, diz-se que este compartimento é de 1 minuto. A janela móvel é um filtro de média móvel que “caminha” a cada período de atuação do controlador trazendo consigo todo o histórico do período de integração anterior.

Figura 17 - Método de controle por janela móvel



Fonte: Do autor com base em Vieira (2016).

3.12.2 Método preditivo adaptativo

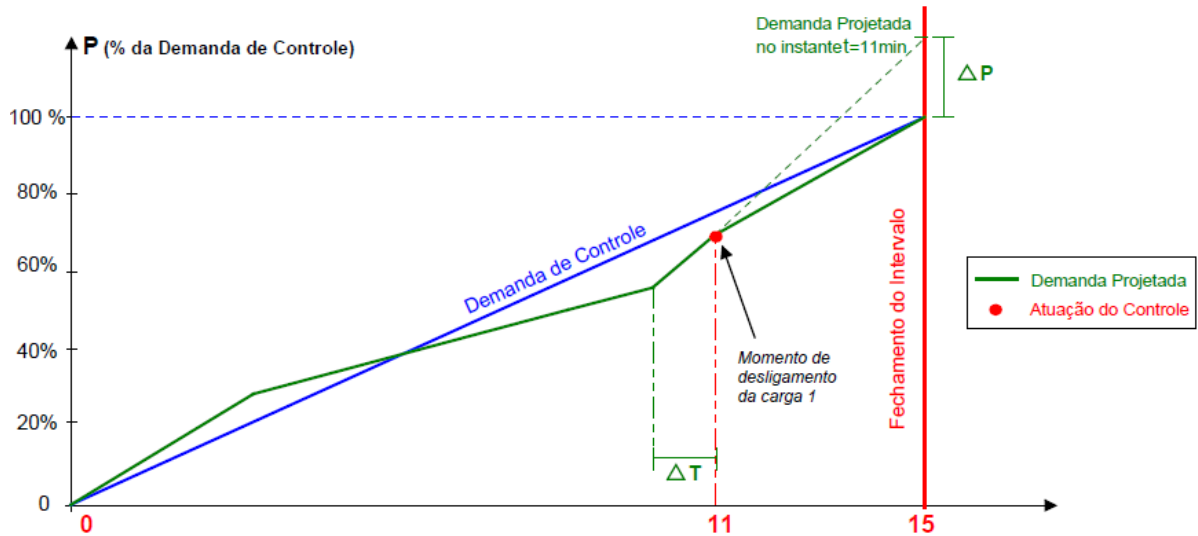
Este método calcula a projeção da demanda dentro do intervalo de integração, fazendo uma previsão de valor de potência das cargas em qualquer período do intervalo (FERNANDES, 2011).

Segundo Vieira (2016), o método trabalha de forma preditiva, onde ocorre o sincronismo dos pulsos elétricos, considerando o marco inicial como sendo o valor de tempo zero (início do intervalo em que ocorre a integração, no interior do qual a demanda é projetada) e conhecendo previamente a potência da carga que será utilizada. Desse modo, pode-se afirmar que a medição aqui realizada estará devidamente sincronizada com a concessionária. Pode atuar também de forma adaptativa.

No método de controle preditivo, existem variantes que definem a eficiência do controlador em termos de chaveamento das cargas conforme sua frequência. Um ajuste condiciona o funcionamento ao desligamento ou acionamento das cargas controláveis, cujo desempenho está relacionado a isso. Outro ajuste modula a carga antes de encerrar o intervalo de integração estipulando assim a demanda máxima que se pretende obter. O algoritmo atua de forma inteligente e consegue adaptar-se às condições operacionais e de processo, permitindo a realização do controle adaptativo mediante as circunstâncias apresentadas (ELETRICISTA, 2018).

Seja qual for a situação apresentada ao nível de verificação, as cargas podem ser influenciadas por variáveis elétricas ou de processo e ainda operar sob condições pré-configuradas pelo usuário. Isso determina com que prioridade irão atuar os controladores sobre a operacionalidade dessas cargas manipuladas (ELETRICISTA, 2018).

Figura 18 - Método preditivo adaptativo



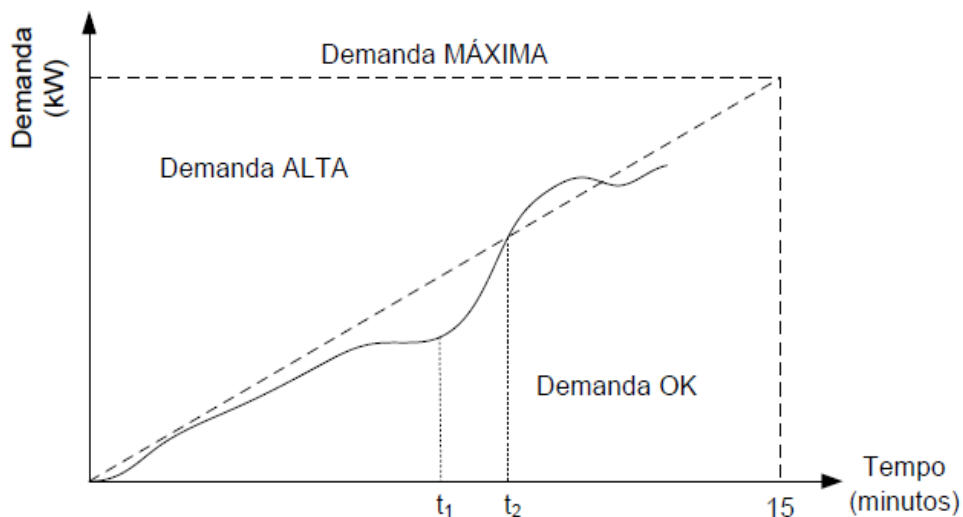
Fonte: Do autor com base em Suppa e Terada (2012).

3.12.3 Método de retas de cargas ou retas inclinadas

Algoritmo baseado em uma regra de três que considera como variantes o número de pulsos acumulados em determinado intervalo de tempo, o tempo transcorrido nesse período e o tempo total do intervalo (VIEIRA, 2016).

Método síncrono que se ajusta às configurações da concessionária, porém impreciso. Por ser lento, à medida que toma decisão de forma atrasada, observa-se que mesmo quando necessário identificar uma demanda de ultrapassagem ou ainda se ela cai evitando assim a interferência sobre cargas desnecessariamente, apresenta uma inadequação provocada por leituras errôneas no início de cada intervalo (VIEIRA, 2016).

Figura 19 - Método retas de cargas ou retas inclinadas



Fonte: Dostálék e Kabelová (2006, p. 239).

4 METODOLOGIA

Após apresentação do referencial teórico e métodos de controle, foi necessário identificar a área do processo industrial com maior consumo de energia elétrica.

O trabalho foi realizado na empresa BRF S.A, está situada a 116 km de Porto Alegre, é uma das maiores companhias de alimentos do mundo, com mais de 30 marcas em seu portfólio, entre elas, Sadia, Perdigão e Qualy. Seus produtos são comercializados em mais de 150 países, nos cinco continentes. Mais de 100 mil funcionários trabalham na companhia, que mantém mais de 50 fábricas em oito países: Argentina, Brasil, Emirados Árabes Unidos, Holanda, Malásia, Reino Unido, Tailândia e Turquia. A unidade onde foi realizado o estudo tem capacidade de abate atual de 480 mil frangos por dia, distribuídos em três linhas de produção e 4 mil suínos, além de uma fábrica de farinha e gorduras, a empresa emprega cerca de três mil colaboradores em ambas as áreas.

A seguir é apresentado os dados da empresa BRF S.A em potencial:

Tabela 4 - Dados em potencial elétrico.

Tipo:	Indústria
Classe de conexão:	Classe A
Tensão de conexão em alta:	69kV subgrupo A3
Medição:	Indireta – TC e TP
Potência instalada:	Conforme contrato
Demanda instalada:	Conforme contrato

Fonte: Do autor.

Para a aquisição de dados de consumo de energia elétrica utilizou-se medidor registrador de grandezas elétricas, equipamento eletrônico portátil dotado de entradas de TC (transformadores de corrente) para medição de corrente, entrada direta para medição de tensão e entrada para TP (transformadores de potenciais) para medições de média tensão. Já os valores de demanda (kWh) e potência (kW, kVAr, kVA) foram obtidos com integralização dos dados de 15 em 15 minutos, baseado no medidor de demanda geral (instalado no cubículo de medição), durante as 24 horas de funcionamento dos equipamentos, ao longo do período de janeiro de 2019 à outubro de 2019.

Com os dados de consumo de energia elétrica de cada setor da fábrica foram geradas curvas de demanda de energia elétrica média diária. Utilizou-se o software Excel através do diagrama de pareto para as análises de valores médios do consumo de energia. Com os dados de consumo e de demanda de energia levantados, foram criados índices denominados de

consumo específico de energia (kWh/mês geral da unidade, kWh/mês do processo de frango abatido e processado, kWh/mês de suínos abatido e processado, kWh/mês da fábrica de subprodutos).

Inicialmente, de modo a justificar a proposta principal do trabalho, serão apresentados os dados de consumo de energia elétrica da fábrica, assim como os períodos que houve a ultrapassagem de demanda na ponta e fora de ponta.

Tabela 5 - Dados gerais de energia elétrica realizada na unidade de Lajeado

FATURA DE ENERGIA: Tarifa Hora Sazonal Azul										
Dem. Realizada H.P. (KW)	12.180	12.550	12.454	12.272	12.586	11.908	11.612	10.816	10.736	11.436
Dem. Contratada H.P. (KW)	11.850	11.850	11.850	11.850	11.850	11.850	11.850	11.850	11.850	11.850
Var. Dem. Real. x Orç. H.P.	2,8%	5,9%	5,1%	3,6%	6,2%	0,5%	-2,0%	-8,7%	-9,4%	-3,5%
Dem. Realizada F.H.P. (KW)	12.432	12.734	12.270	12.004	12.468	11.612	11.880	10.964	12.528	10.920
Dem. Contratada F.H.P. (KW)	12.200	12.200	12.200	12.200	12.200	12.200	12.200	12.200	12.200	12.200
Var. Dem. Real. x Orç. F.H.P.	1,9%	4,4%	0,6%	-1,6%	2,2%	-4,8%	-2,6%	-10,1%	2,7%	-10,5%
Consumo compra H.P. Total Real. (KWh)	647.615	729.274	651.001	706.362	722.474	544.578	550.948	599.307	670.503	528.907
Consumo compra H.P. Total Orç. (KWh)	635.251	617.322	656.041	630.359	620.139	586.404	618.870	643.953	550.840	631.255
Var. Consumo. Real. x Orç. H.P	1,95%	18,14%	-0,77%	12,06%	16,50%	-7,13%	-10,98%	-6,93%	21,72%	-16,21%
Consumo compra Total Real. (KWh)	5.632.794	6.085.164	5.002.991	5.234.253	5.137.996	4.164.110	4.576.036	4.544.324	4.719.110	4.095.965
Consumo compra Total Orç (KWh)	5.267.119	5.118.459	5.439.493	5.226.551	5.141.817	4.862.108	5.131.291	5.339.271	4.567.233	5.233.985
Var. Consumo. Real. x Orç.	6,9%	18,9%	-8,0%	0,1%	-0,1%	-14,4%	-10,8%	-14,9%	3,3%	-21,7%
% Cons. Energia na Ponta Real.	10,3%	10,7%	11,5%	11,9%	12,3%	11,6%	10,7%	11,7%	12,4%	11,4%
% Cons. Energia na Ponta Orçada	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%	12,06%
Var. % Energia. Real. x Orç. H.P.	-14,50%	-11,27%	-4,53%	-1,41%	2,22%	-4,11%	-10,90%	-3,39%	3,15%	-5,18%
Consumo Orçado Terceiros (KWh)	259.606	228.516	239.397	239.397	237.843	239.397	247.170	259.606	204.420	247.170
Consumo Transf. Terceiros (KWh)	283.970	270.883	294.590	273.996	215.957	283.801	275.092	299.087	230.757	288.700
Var. % Energia Gerada Total Real. x Orçada	-8,58%	-15,64%	-18,74%	-12,63%	10,13%	-15,65%	-10,15%	-13,20%	-11,41%	-14,39%
Multa Ultr. Demanda (R\$)		16.660,00	14.375,20		24.460,01					
Multa Fator de Potência (R\$)	70,46			39,36		842,99	78,42	47,95	577,60	407,29

Fonte: Do autor.

Analisando a tabela acima, e através dos dados obtidos pela leitura realizada nos meses que compõem a coleta das informações, observa-se um consumo além do contratado nos meses de fevereiro, março e maio, os quais geraram multas no valor total de R\$ 55.495,21, este devido principalmente pela ausência de método de controle na demanda contratada. Valor qual é agregado a conta de energia da unidade, interferindo diretamente nos indicadores.

Após evidenciado o problema principal, e identificado que houve períodos durante a coleta de dados onde a demanda medida foi ultrapassada é necessário identificar as áreas com maior consumo, e priorizar as cargas a serem desligadas ou moduladas, evitando assim encargos gerados por multas na ultrapassagem de demanda medida.

Para isto, foi realizado a leitura de consumo em pontos estratégicos, pois no ambiente produtivo de um frigorífico as maiores cargas estão concentradas na área de utilidades (sala de máquinas e sistema de tratamento de efluentes), estes por comportarem motores com potência elevada. A coleta de dados se deu no período de janeiro a outubro de 2019, e foi realizada através do equipamento Power Monitor 500 e 1000 (medidor registrador de grandezas elétricas), instalados nos QGBT que alimentam os equipamentos, o qual é um multimedidor eletrônico portátil.

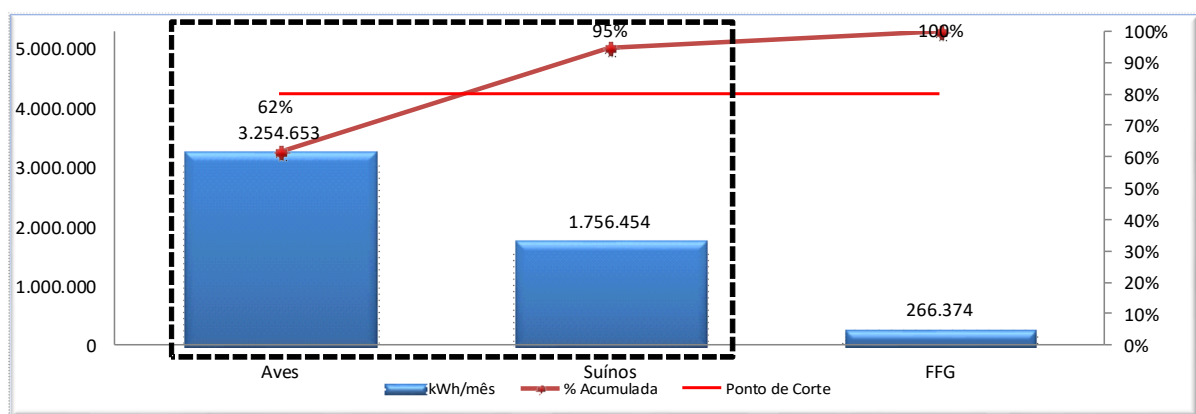
Figura 20 - Medidor de grandezas elétricas power monitor 500 e 1000 utilizado na coleta de dados.



Fonte: Do autor.

Inicialmente para um melhor entendimento serão apresentados os dados coletados separados por processo produtivo, e em seguida expandida em setores e áreas fábris.

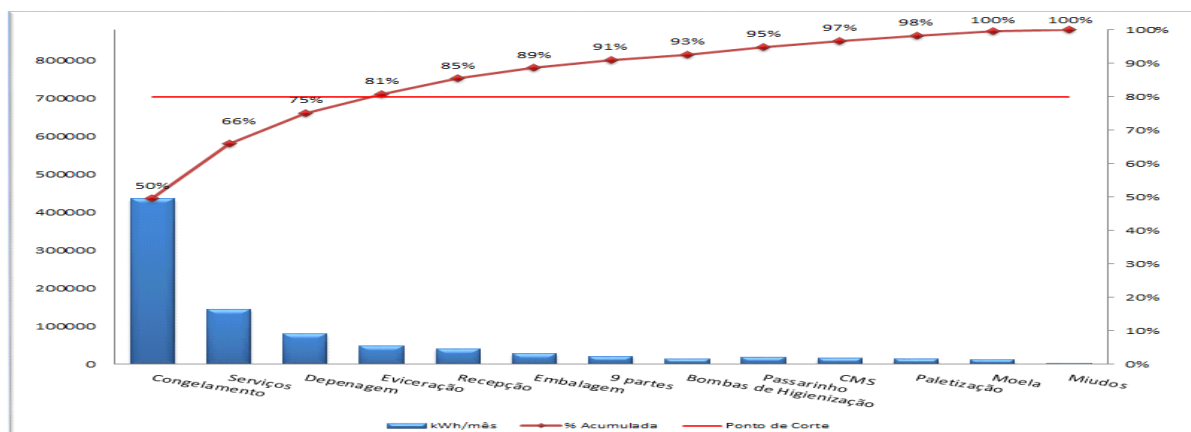
Figura 21 - Consumo de energia por processo produtivo.



Fonte: Do autor.

Através do gráfico acima pode-se perceber que o maior consumo está concentrado no processo de aves, o qual é responsável por 62% do consumo de energia seguido pelo processo de suínos e fábrica de farinha e gorduras. Sabendo-se o ponto de maior concentração de consumo, a próxima etapa deu-se na coleta do consumo separado por setores, ou seja, o valor demanda de energia subdivididos em áreas do processo.

Figura 22 - Consumo de energia por processo produtivo aves setorizados



Fonte: Do autor.

Conforme gráfico, fica evidente que o ponto de maior consumo é na área de congelamento, o qual está concentrado os compressores de amônia responsável por realizar a refrigeração do produto. Estas são máquinas com potência elevada, variando de 150 a 500cv, as quais realizam a refrigeração dos ambientes climatizados e dos túneis de congelamento dos produtos acabados.

Após a coleta de dados durante os meses mencionados acima e identificação dos pontos de concentração de maior consumo, ficou evidente que o setor de refrigeração/congelamento é a área do processo produtivo responsável por demandar o maior consumo de energia elétrica, porém para aplicar o trabalho proposto, é necessário avaliar também a criticidade do processo, se no instante de tempo que houver uma ultrapassem de demanda, é possível e viável reduzir o consumo de energia destes equipamentos.

Em ambos processos estudados, a conta de energia é um dos custos fixos mais significativos da empresa, visto que as mesmas necessitam de máquinas com potências elevadas para manter o processo dentro dos padrões preconizados por normas e legislações. O controle de demanda de energia se torna um item indispensável, pois através deste controle evita-se tarifas extras oriundas de consumos excessivos fora dos limites pré-estabelecidos.

É fundamental definir um método de controle, qual estratégia será utilizada para monitorar e controlar a demanda, pois é este quem determina a maior ou menor precisão do controlador. Além deste estudo, outro desafio é definir quais cargas serão “desligadas” sem afetar o processo produtivo, visto que, para se ter um controle efetivo, é necessário realizar a seletividade das cargas de maior potência, onde consequentemente o impacto será maior, ou até mesmo um agregado de cargas, porém devido a restrições de processo isso nem sempre será possível. Para se realizar a implementação de um sistema de controle de demanda de

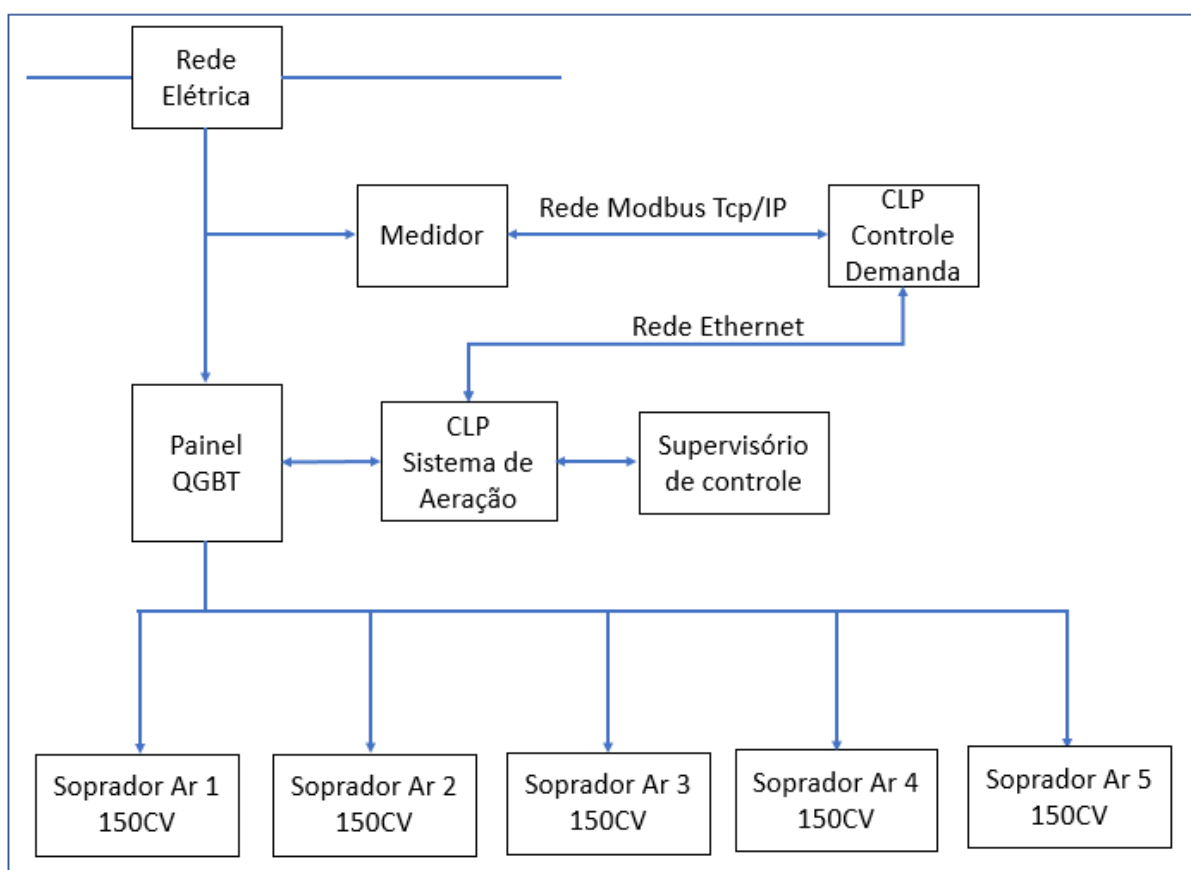
energia, é imprescindível a realização de um estudo amplo, conhecer as áreas de maior consumo, identificar melhorias na gestão de eficiência energética, e por fim definir quando necessário, quais cargas poderão ser seletivas ou moduladas no processo.

5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os componentes utilizados no projeto: medidor de energia, controlador lógico programável, meio físico de comunicação, desenvolvimento e arquitetura de software, e a aplicação de modulação ou desligamento de cargas em pontos estratégicos do parque industrial.

O proposto trabalho trata da implementação de um sistema de controle de demanda de energia elétrica em um processo industrial, fornecendo a indicação de consumo de potência ativa instantânea, consumo acumulado, e sistemática de controle caso converja para uma ultrapassegem de demanda. Inicialmente será apresentado um diagrama geral exibindo de forma genérica os dispositivos, comunicação entre os periféricos e funcionamento do sistema aplicado no trabalho proposto.

Figura 23 - Diagrama de blocos sistema implementado



Fonte: Do autor.

Conforme diagrama apresentado na figura acima, o sistema é composto por um multimedidor eletrônico de energia o qual está interligado a rede elétrica de entrada geral. Este equipamento comunica-se com o controlador lógico principal, que tem por objetivo realizar a leitura do consumo de energia elétrica instantânea e através de um algoritmo,

identificar quando a demanda está se aproximando da máxima contratada. Caso confirmado a convergência é executado um método de controle através da modulação ou desligamento das cargas a fim de manter-se os valores preconizados em contrato com a distribuidora de energia. Os valores lidos são armazenados e exibidos em gráficos via supervisor, onde que com um histórico de consumo pode-se prever um contrato de demanda o mais próximo possível do consumido.

Na Figura 24, é apresentado o medidor instalado na entrada do sistema de energia, o qual está conectado aos dispositivos TC's e TP's da subestação. Conforme pode-se verificar na face do multimetido, é apresentado a tensão atual, e consumo realizado no instante de tempo da geração da imagem. Entretanto estes dados são apenas indicativos e apresentados na face do equipamento, não sendo armazenados e nem tratados de forma a evitar a ultrapassagem de demanda.

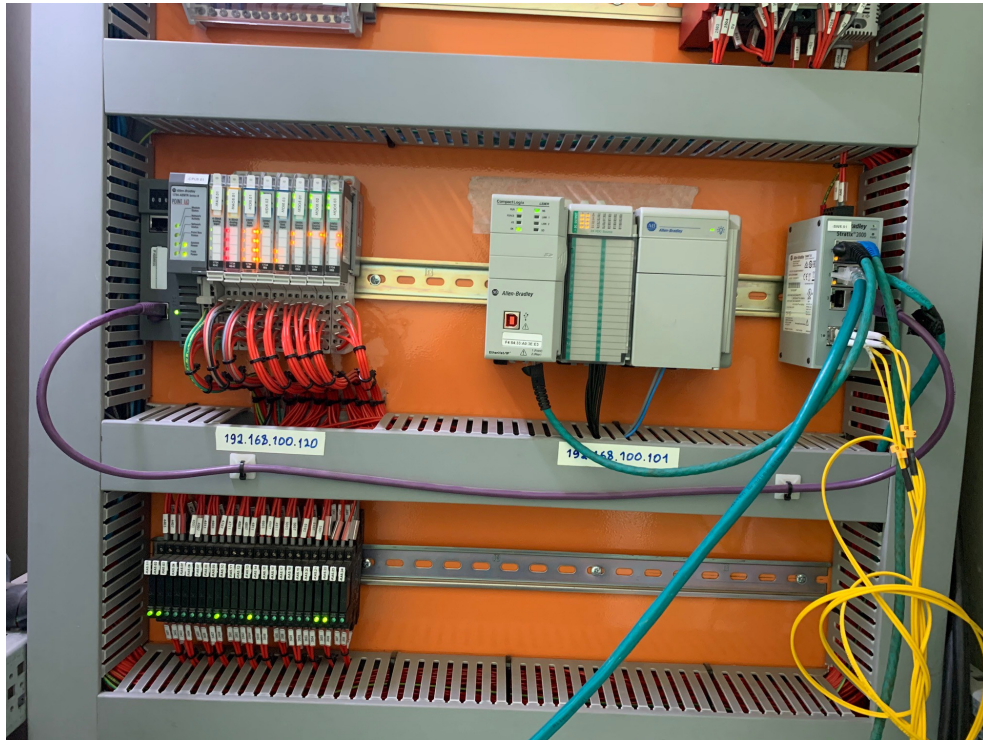
Figura 24 - Instalação medidor na entrada do sistema de energia.



Fonte: Do autor.

A aquisição dos dados é realizada via rede Modbus TCP/IP conectada ao controlador lógico programável. Através de consultas e endereçamentos realizados no multimetido a leitura de consumo atual é convertida em valores reais e armazenados no controlador (CLP).

Figura 25 - CLP principal que se comunica com o medidor de energia



Fonte: Do autor.

Para uma visualização ampla do consumo, foi desenvolvido um gráfico via supervisor, no mesmo é possível selecionar o período da coleta de dados, identificar pontos e horários de maior consumo, e a linha de demanda ao longo do tempo.

Figura 26 - Leitura em tempo real apresentada em gráfico via supervisor

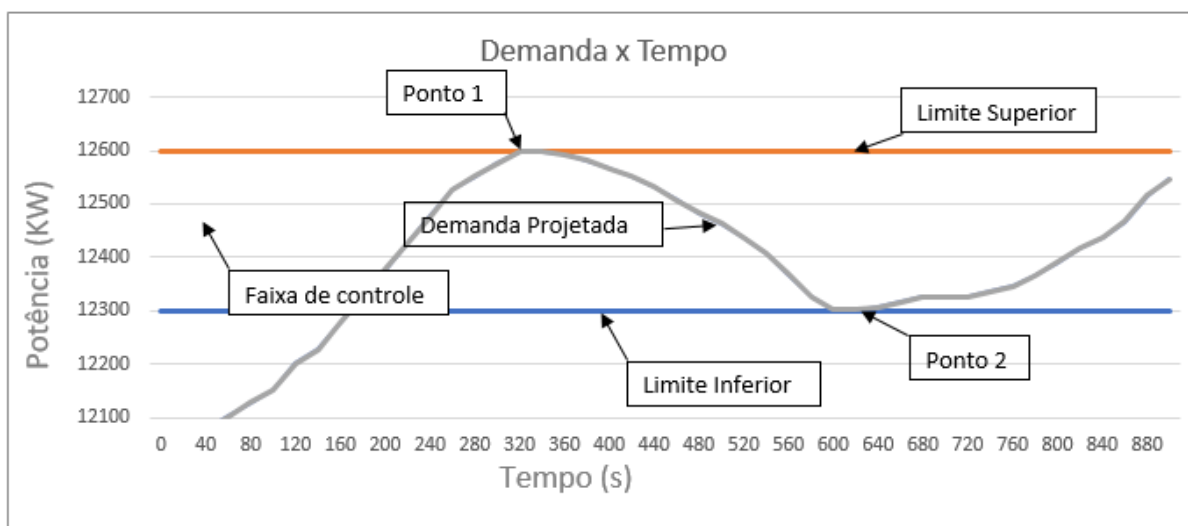


Fonte: Do autor

O controle de demanda foi implementado com base no algoritmo reta de carga, como apresentado na Figura 19, a referência de demanda tomada como base é a contratada, ou seja, 11.850kW no horário de ponta e 12.200kW no horário fora de ponta. Existe a tolerância de

+5% devido ao enquadramento da medição ao subgrupo A3, para as unidades cuja tensão de fornecimento seja maior ou igual a 69 kV, porém a banda de controle será de 300kW. Para um limite superior será adotado o valor de 12.250kW no horário de ponta e 12.600kW no horário fora de ponta, e limite inferior de 11.950kW no horário de ponta e 12.300kW no horário fora de ponta.

Gráfico 1 - Exemplo de controle com crescimento da demanda no tempo H.F.P



Fonte: Do autor.

No exemplo acima pode ser visto o meio de controle através de dois pontos, o ponto 1, indica a ultrapassagem do limite superior (demanda contratada), momento em que as cargas começam a ser desligadas ou moduladas até que a demanda projetada retorne para dentro da faixa de controle.

O ponto 2, indica a passagem da demanda projetada pelo limite inferior, momento em que o sistema de controle começa a religar a carga ou carregar o setpoint de trabalho original antes da redução de potência. Caso a demanda projetada esteja dentro da faixa de controle, não haverá atuação sobre as cargas, mantendo o consumo e cargas atuais do sistema em pleno funcionamento. O controlador tem como objetivo manter a demanda consumida dentro das faixas de controle, as quais não ultrapassam os valores contrados no horário de ponta e fora de ponta.

O algoritmo desenvolvido realiza a leitura da demanda consumida através de endereçamentos na memória e leitura de parâmetros predeterminados no medidor, este valor é adquirido em tempo real e atualizado instantaneamente.

Além do desenvolvimento do código para a leitura de energia, foi necessário implementar uma lógica para rearmar dos dados e apresentação do valor lido de forma real,

pois os mesmos são compostos de vários bits, lidos em variáveis distintas com seus valores apresentados na forma hexadecimal.

Caso seja atingido o valor limite pré-determinado na ponta ou fora de ponta, é exibido uma tela de alarme no sistema supervisão, o qual é monitorado pela equipe de operação. Por segurança foram definidos 2 níveis de alarmes com atuação de advertência e por fim, 1 alarme com advertência e atuação sobre a redução das cargas do sistema:

- 1 - Quando consumo atingir 95% demanda contratada.
- 2 - Quando consumo atingir 100% demanda contratada.
- 3 - Quando consumo atingir 103% da demanda contratada.

Para este último nível, o qual é necessário realizar uma intervenção das cargas do sistema, é executado uma troca de informação entre o controlador principal, o qual monitora o consumo de energia, com o controlador dos equipamentos (cargas) do sistema de aeração, quando ultrapassado o limite admissível da demanda é enviada uma instrução para redução de setpoint de trabalho ou caso necessário o desligamento dos equipamentos.

Por precaução tem-se a margem de 2% (em torno de 210kW no horário fora de ponta e 200kW no horário de ponta), caso outra carga seja acionada, garantindo assim que o valor não ultrapasse os 5% que é o limite máximo para os parâmetros de contrato.

No controlador do sistema de aeração (sopradores de ar), foi desenvolvido uma lógica de técnica de controle proporcional integral derivativo, controlador PID, o qual recebe um setpoint desejado, e o algoritmo de controle de processos une ação derivativa, integral e proporcional, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipativa pela ação derivativa.

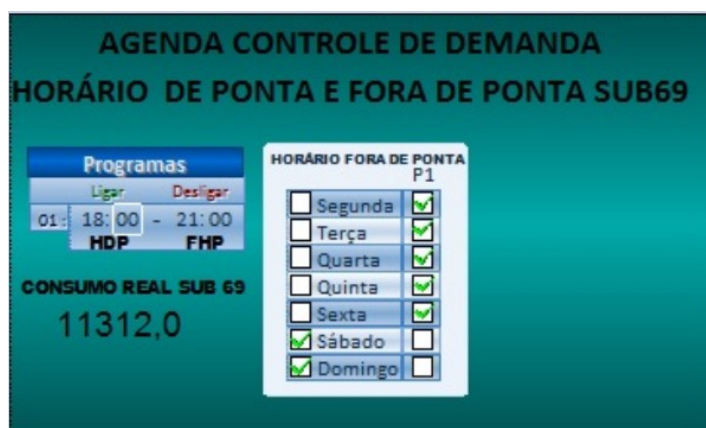
A modulação só é possível visto que os sopradores principais são dotados de partida por inversor de frequência. No instante que é iniciado a redução das cargas, por definição de funcionamento deseja-se manter uma faixa de controle, a qual deve operar dentro de valores predeterminados, porém esta redução pode atingir limites não desejados, ou seja, outras cargas que não estão sendo monitorados pelo sistema de controle poderão sofrer interferência da operação fazendo assim com que o limite fique muito abaixo do valor contratado, esta ação seria prejudicial ao sistema de controle e também para os parâmetros de eficiência no processo.

Para evitar um desperdício de recursos e equipamentos, junto a lógica de funcionamento, foi implementado um limite mínimo de consumo, o qual quando atingido, iniciará o processo de retomada de cargas desligadas ou moduladas em um setpoint abaixo do

original, fazendo assim com que o sistema volte a operar de tal forma que se encontrava antes do processo de redução de cargas.

Afim de realizar uma seleção de horários e dias da semana, foi desenvolvido um algoritmo para realizar o controle de demanda através do horário de ponta e fora de ponta, pois o contrato de energia elétrica da empresa onde foi aplicado o trabalho, possui valores distintos nestes dois períodos. Sendo assim necessário realizar um controle através de agendamentos diferenciando horário fora de ponta e de ponta, o qual tem um período de 3 horas diárias iniciando das 18:00 horas até as 21:00 (exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, “Corpus Christi”, e oito dias de feriados), descrito na resolução ANEEL 414.

Figura 27 - Configuração de agendamento disponível em supervisório



Fonte: Do autor

Com o agendamento disponível via supervisório, é possível flexibilizar os horários e dias da semana, permitindo realizar ajustes dinâmicos atendendo ou não os horários definidos em resoluções.

O código desenvolvido que está em funcionamento atende os horários de ponta e fora de ponta definidos pela ANEEL e contrato firmado com a concessionária de energia elétrica. Inicialmente é realizado o controle da demanda máxima aceitável, ou seja, quando atingir o valor preconizado no bloco (103% da demanda contratada), é emitido um aleta para a operação e automaticamente realizado a redução de cargas do sistema.

A instrução seguinte trata da demanda mínima admissível, onde após o disparo para a redução de consumo as cargas tendem a convergir para uma redução de demanda, esta não poderá ser inferior ao valor preconizado, visto que, quando atingido será reestabelecido as cargas desligadas fazendo com que o sistema permaneça na faixa de controle conforme apresentado no Gráfico 1.

E por fim é realizado o controle dos valores iniciais para ativação do alarme a operação, onde o primeiro será acionado no momento que a demanda atingir 95% da contrada e o segundo alarme quando atingir 100% da demanda. Estes dois serão somente alarmes de advertência, nestes casos não serão realizado nenhuma ação sobre o sistema de redução de cargas.

Para o controle da demanda fora do horário de ponta é utilizado a mesma lógica, porém diferenciando os valores de demanda equandrando-se nos definidos em contrato. Neste caso, também é realizado a redução de cargas assim como os alarmes de advertência para a operação.

Entretanto, o montante de informações, avisos e alertas são apresentados somente para a equipe de operação dos sopradores de ar, sendo que, a abrangência da fábrica vai além desta, como por exemplo, pode-se citar outra área de grande consumo de energia como a geração de frio (responsável por manter climatizado e refrigerados ambientes e matéria prima).

Neste momento, não foi realizado a retirada de cargas da mesma, porém foi implementado no supervisório de operação dos compressores de amônia, a indicação de consumo de energia atual, e o envio de alarmes identicos aos informados para a equipe de operação dos sopradores. Sendo assim, em caso crítico, também poderá ser realizado uma redução de cargas de forma manual na área de refrigeração.

5.1 Aplicação no cenário descrito e homologação dos resultados

O cenário para a validação é idêntico ao apresentado no diagrama da Figura 23, o qual, após análise das cargas e os pontos de concetração de maior consumo da fábrica, foram definidos os locais de monitoração e aplicação do controle de demanda, considerado como o ambiente ideal para a implementação do trabalho.

Sistema de tratamento de efluentes, composto pelo seguintes equipamentos:

1. Quadro geral de baixa tensão, e dispositivos de automação;
2. Sistema de supervisório para operação;
3. Soprador de Ar 1;
4. Soprador de Ar 2;
5. Soprador de Ar 3;
6. Soprador de Ar 4;
7. Soprador de Ar 5.

Figura 28 - Componentes do sistema de aeração, injeção de ar

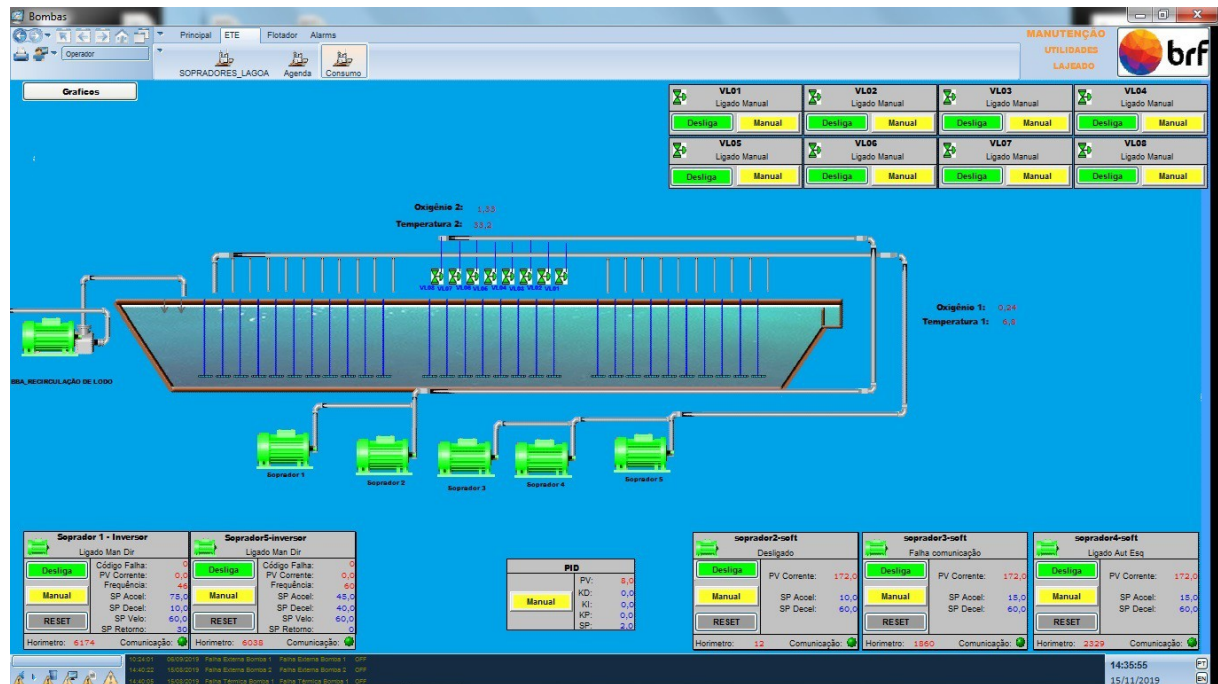


Fonte: Do autor

Para realizar o controle de demanda do ambiente apresentado acima, o controlador principal (o qual realiza a leitura do consumo de energia elétrica geral), está conectado via rede Ethernet com o controlador do sistema de aeração, este monitoramento acontece em tempo real, e caso sejam atingidos os limites predefinidos via as regras apresentadas nos parágrafos anteriores, é realizado a troca de dados entre os dispositivos acionando o gatilho de desligamento/modulação de cargas do sistema. No Apêndice B, pode ser consultado o código desenvolvido para realizar o controle das cargas.

A operação acontece de forma automatizada com a utilização de supervisório de monitoramento e controle de todo o sistema, através do mesmo é possível interagir com o conjunto de equipamentos, monitorar suas variáveis e selecionar os setpoint de controle para uma estabilidade no tratamento de efluentes. O operador inicia o startup dos equipamentos, colocando-os em funcionamento através de botão liga/desliga, e o algoritmo desenvolvido realiza os ajustes conforme parâmetros de leitura do sistema.

Figura 29 - Exibição do supervisório de controle do sistema de aeração



Fonte: Do autor

Inicialmente é apresentado o sistema funcionando em plena carga, sem a intervenção do controle de demanda, conforme pode ser observado na figura abaixo a demanda de energia está condizente com os valores preconizados no contrato, não sendo necessário agir sobre as cargas.

Figura 30 - Demanda dentro da faixa de contrato



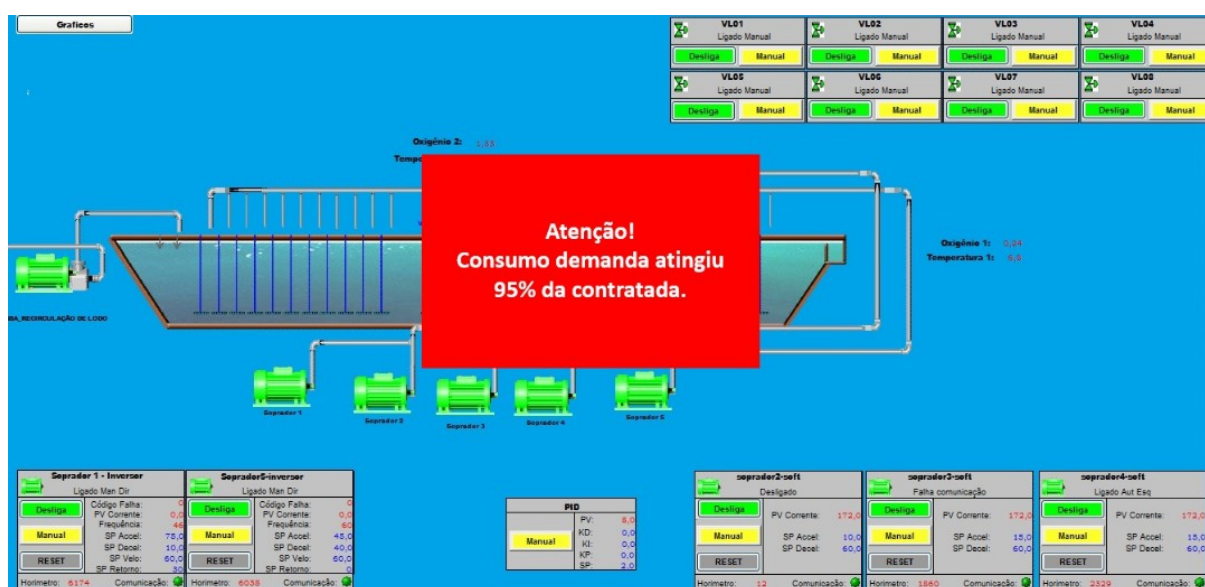
Fonte: Do autor

A partir do acionamento das cargas em outros setores da fábrica, o consumo de energia também é incrementado, fazendo com que os limites de consumo fiquem próximos dos estabelecidos como aceitáveis e máximos. Não necessariamente este incremento acontece

somente por oscilações dos equipamentos do sistema de aeração, mas sim podem sofrer interferência de qualquer carga distribuída no parque fabril, visto que a leitura está sendo realizada na medição de entrada.

A seguir é apresentado o primeiro alarme de indicação de um aumento no consumo de energia elétrica, este acontece quando a demanda lida atingir 95% da demanda contratada. No horário de ponta este valor é fixado em 11.250kW, e fora do horário de ponta em 11.600kW.

Figura 31 - Alarme nível 1 onde a demanda atingiu 95% da contratada

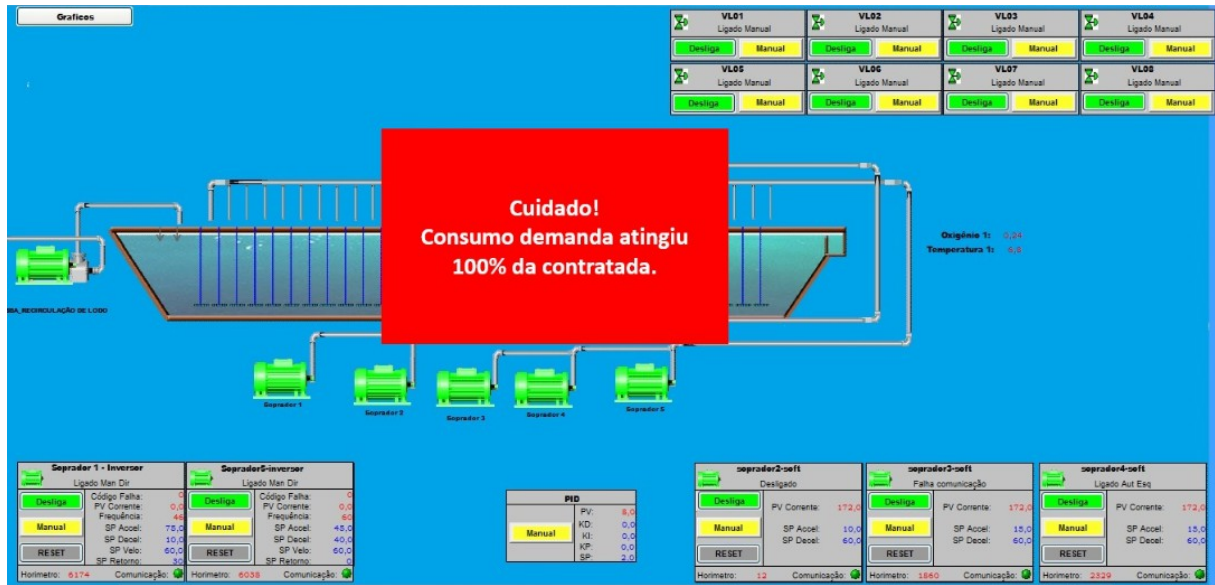


Fonte: Do autor

O alarme de nível 1 tem como principal objetivo atuar na advertência para a operação, onde o consumo de energia está se aproximando do valor contratado.

O segundo nível de alarme é exibido sempre que a demanda atingir 100% do valor de contrato, não é considerado neste caso os 5% de tolerância devido a classe de enquadramento do consumidor. No horário de ponta este valor é fixado em 11.850kW, e fora do horário de ponta em 12.200kW. Este alarme é de suma importância, pois pode-se tomar iniciativas para anteceder-se a uma ultrapassagem de demanda, como por exemplo com a verificação de parâmetros e limites de operação.

Figura 32 - Alarme nível 2 onde a demanda atingiu 100% da contratada

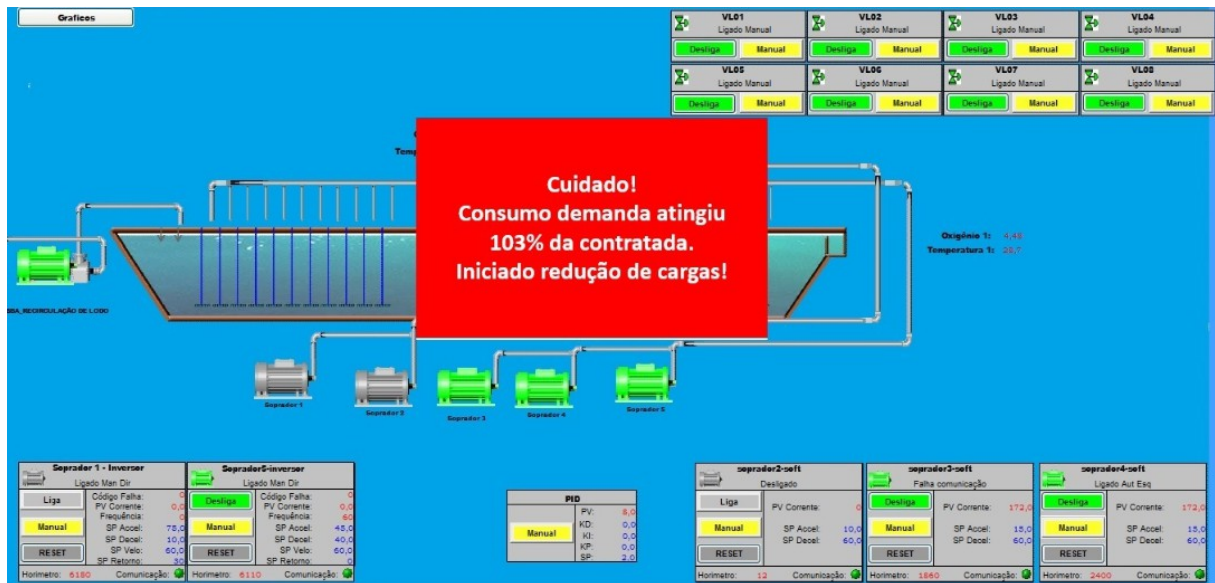


Fonte: Do autor

Na apresentação de alarme nível 2, não é realizado um desligamento ou modulação de cargas, porém se por segurança o operador julgar necessário fazer este procedimento, a operação deverá ser realizada de forma manual.

O terceiro e último nível de alarme é exibido sempre que a demanda atingir 103% do valor de contrato, por definição em resolução, sabe-se que o cliente em questão é penalizado por multas quando a demanda lida ultrapassar a tolerância de 5% da contratada. Por fator de segurança foi mantido o percentual de 2% sobre a tolerância, visto que, no momento da ultrapassagem pode vir a ocorrer o acionamento de outras cargas não monitoradas no presente trabalho, com isto, tem-se a garantia que não será atingido níveis de consumo que acarretarão em multas desnecessárias, pois com a margem estabelecida apresentada em potência elétrica tem-se os valores de 200kW H.P. e 210kW H.F.P.

Figura 33 - Alarme nível 3 onde a demanda atingiu 103% da contratada



Fonte: Do autor

A partir da exibição do alarme de nível 3, imediatamente o sistema de controle iniciará o desligamento ou modulação da carga, para este caso o operador não irá interceder no sistema (quando habilitado o controle de demanda), o mesmo não terá atuação no controle e também não poderá impedir o início da redução da demanda, entretanto, antes de iniciar o processo de desligamento, o algoritmo de controle realizará uma consulta na lógica de funcionamento, verificando se a máquina está trabalhando em plena carga, caso positivo é iniciado a modulação reduzindo a mesma até que a demanda se enquadre dentro da faixa de controle apresentada no Gráfico 1. Caso a modulação realizada não seja suficiente para atender o valor desejado, é iniciado a modulação ou desligamento do próximo equipamento, e assim sucessivamente até atingir o valor desejado.

Figura 34 - Consumo de energia antes e após o início de desligamento de cargas

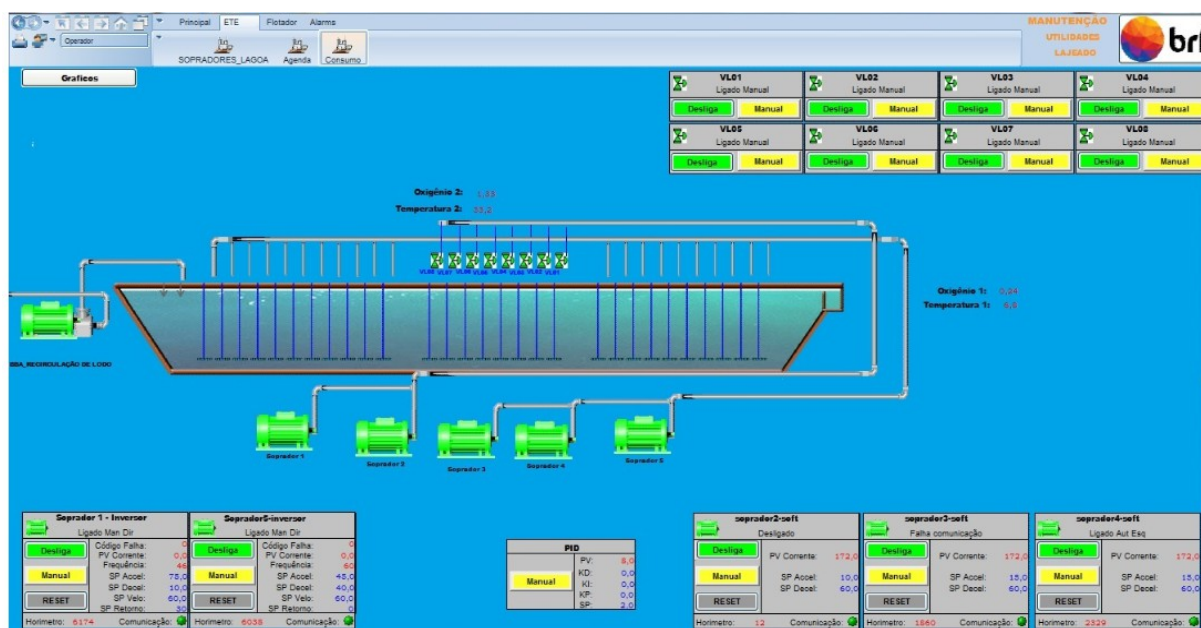


Fonte: Do autor

Conforme pode ser observar, após o início do desligamento das cargas o consumo de energia convergiu para dentro da faixa de operação, evitando assim que seja atingido valores acima do preconizado. Para o controle de energia, quanto menor o consumo, menor será o montante realizado na fatura de energia, porém para o processo produtivo esta situação pode ser prejudicial. Afim de garantir que o sistema volte a reestabelecer as cargas desligadas, foi definido um limite mínimo de demanda, no momento que este for atingido, o algoritmo de controle reestabelecerá as cargas mantendo a estabilidade de operação. Para o proposto trabalho, definiu-se um valor mínimo admissível de 11.950kW no horário de ponta e 12.300kW no horário fora de ponta.

Com a reestabilização o sistema de tratamento de efluentes volta a operar em condição original antes do desligamento de seus equipamentos.

Figura 35 - Reestabilização das cargas do sistema de tratamento de efluentes



Fonte: Do autor

Isto foi possível pois enquanto a redução era realizada, houve a oscilação/redução de cargas de outros setores do parque fabril, pois estas acabam impactando no sistema, sendo que a medição é realizada na entrada geral de alimentação. Caso este fato não ocorresse, os equipamentos continuariam desligados ou com velocidade reduzidas, até que se fosse atingido o valor para reestabilização.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de demanda de energia dotado de capacidade de comunicação, supervisão monitoramento e controle de cargas aplicado em instalação de uma indústria de grande porte, eliminando a necessidade de instalação de dispositivos de elevado custo para o gerenciamento de energia.

Diante dos testes e resultados apresentados conclui-se que um sistema de controle de demanda é de fundamental importância para as indústrias, sendo elas de pequeno, médio e grande porte, mesmo não tendo uma implantação fácil, pois requer um domínio na área de engenharia elétrica e automação, ter o controle sobre a demanda pode evitar multas além de diminuir o consumo já que o operador terá uma visão simplificada do que está gastando em planta.

A possibilidade de redução da demanda, fazendo-se uma seleção adequada das cargas a serem retiradas, permite que se trabalhe dentro dos níveis aceitáveis, favorecendo a competitividade das indústrias e auxiliando no atendimento dos indicadores de eficiência energética, pois conforme apresentado, durante a fase de coleta de dados no período de Janeiro a Outubro de 2019, teve-se encargos devido a ultrapassagem de demanda gerando um custo para a indústria de R\$ 55.495,21.

Enfim, fazendo uma análise do que foi exposto nesse trabalho, tendo em vista o perfeito funcionamento da aplicação realizada, o gerenciamento inteligente de energia elétrica, que hoje é um insumo importante para indústria, influi diretamente na produtividade e na capacidade de competir, tornando a indústria cada vez mais inteligente e propicia a receber novas tecnologias.

Fica como sugestão futura, o incremento de novas cargas, ou seja, incluir o controle de demanda de outros setores fabris, ampliando a possibilidade de desligaentos, também pode ser interessante prever um sistema rotativo de cargas de modo que não seja sempre a mesma carga a ser ligada e desligada. Afim de ampliar a disseminação da informação de consumo, fica como sugestão secundária a implementação de um sistema de SMS ou e-mail para envios de alertas e controles à distância (remoto) para a área de supervisão.

Também pode-se aprimorar o método de controle, no qual o controlador “sentiria” a tendência da ultrapassagem da demanda, como é o caso do controle preditivo adaptativo, postergando o chaveamento das cargas até o último momento.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução n.º 456, de 29 de novembro de 2000. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2019.

ANNEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. **Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2019.

ANNEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 547, de 16 de abril de 2013. **Estabelece os procedimentos comerciais para aplicação do sistema de bandeiras tarifárias**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/ren2013547.pdf/c891e96e-9d30-43a0-870c-c1c4b725dbbd?version=1.0>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho; BORTONI, Edson da Costa; NOGUEIRA, Fábio José Horta. **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. Campinas Sp: Elektro, 2012. 315 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, DF, 2008. 236 p.

FILHO, S. D. M. **Medição de Energia Elétrica**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

SUPPA, M.R., TERADA, M.I. **Artigo Comparativo entre métodos de controle de demanda: qual o mais eficiente para o usuário nacional**. São Paulo: GESTAL, 2012. Disponível em: <<http://gestal.com/files/8614/3075/2696/comparativo-entre-metodos-de-controle-de-demanda-qual-o-mais-eficiente-para-o-usuario-nacional.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2019.

OZUR, F. S.; PEREIRA, T. H.; CORREA, J. S. **Controle de demanda de energia elétrica**. 3e-xacta, Belo Horizonte, v. 4, 2011, p. 191-202.

ELETRICISTA, Portal do. Consumo eficiente: **O uso do controlador de demanda**. Disponível em: <<http://www.portaleletricista.com.br/uso-do-controlador-de-demanda/>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

SOARES, Luiz Fernando Gomes; LEMOS, Guido; COLCHER, Sergio. **Redes de computadores: das LANs, MANs e WANs as Redes ATM**. 6ª edição. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

FERNANDES, Ueslei Barbosa. **Controle de demanda de energia de um sistema elétrico**. 2011. Disponível em: <http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2011/IX_CEEL_027.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2019.

ANDREOLI, André, Cagnon, José A, Fontes, Ivo, Malara, Michel, Franco, Paul. **Sistema de Controle de Demanda Aplicado a Consumidores de Baixo Porte**. São Paulo: UNESP, 2008. 6 p.

ENERGIA, Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138781/0/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Janeiro+-+2019.pdf/06f9d12f-7ec4-4dd6-add2-74a8c46a62bb>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

VIEIRA, Mateus Coelho. **Controlador de demanda de energia utilizando inteligência computacional**. 2016. 137 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Sistemas e Automação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

CARVALHO, Raphael Pinati de. **Análise do consumo d e energia elétrica e da eficiência energética em uma indústria de processamento de madeira**. 2011. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Engenharia Industrial Madeireira, Itapeva - Sp, 2011.

SALLES, Ronaldo de Oliveira. **Estudo sobre os esquemas de rejeição de cargas para sistemas elétricos de potência**. 2012. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos - Sp, 2012.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Manual de tarifação da energia elétrica**. Rio de Janeiro, RJ, 2011. 55 p.

FUGIMOTO, Sérgio Kinya. **Estruturas de tarifas de energia elétrica análise crítica e proposições metodológicas**. 2010. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - Sp, 2010. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde.../Tese_Sergio_Kinya_Fugimoto.pdf>. Acesso em: 31 maio 2019.

Ministério de Minas e Energia. **Tarifa de Energia Elétrica**. 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/5-tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 31 maio 2019.

RGE SUL DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A. **Regulamento de Instalações Consumidoras Fornecimento em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea**. Disponível em: <https://www.rge-rs.com.br/atendimento-a-consumidores/orientacoes-tecnicas/publicacoes-tecnicas/normasrgesul/RIC_MT_-_Regulamento_de_Instalações_Consumidoras_-_MT.pdf>. Acesso em: 31 maio 2019.

HADDAD, J. **Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação**, 2004. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Energ_Elet_Conceitos_Qualid_Tarif_El_etr_Procel-04.pdf>. Acesso em: 22 Setembro 2019.

TANENBAUM, Andrew S. **Redes de computadores**. 4^a edição. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

CASTELLI, Matthew J. **LAN Switching first-step**. Indianapolis: Cisco Press, 2004.

NOONAN, Wes; DUBRAWSKY, Ido. **Firewall fundamentals**. Indianapolis: Cisco Press, 2006.

DOHERTY, Jim; ANDERSON, Neil; MAGGIORA, Paul Della. **Cisco networking simplified**. CISCO. 2ª edição. Indianapolis: Cisco Press, 2007.

HELD, Gilbert. **Ethernet networks: Design, Implementation, Operation, Management**. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

HUNT, Craig. **TCP/IP network administration**. 3ª edição. Sebastopol: O'Reilly, 2002.

HENRIQUE, Matheus. **Controladores de Demanda**. 2003. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2003.

KLEPA, Guilherme Henrique Tognietti; PEREIRA, Isaias Vandoski. **Automação para análise e controle de demanda de energia elétrica em shopping centers**. 2013. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013.

ANTONELI, L. 1998. **Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)**. Disponível em: <<http://claudinhamatematica.com.br/Introducao%20CLP.pdf>>. Acesso em: 12 de abril. 2019.

ANDREOLI, André Luiz. **Controlador de demanda e fator de potência de baixo custo para unidades consumidoras de energia elétrica** 2005. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Mestre em Engenharia Industrial, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

MCQUERRY, Steve. **Interconnecting cisco network devices**, Part 1 (ICND1). 2ª edição. Indianapolis : Cisco Press, 2008.

SPORTACK, Mark A. **TCP/IP first-step**. Indianapolis: Cisco Press. 2004.

TORRES, Gabriel. **Redes de computadores**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Novaterra, 2009.

TANENBAUM, Andrew S. **Computer networks**. 4ª edição. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

SCHWENDTNER, M. F. **Technological Developments in Electricity Metering and Associated Fields**. Metering and Tariffs for Energy Supply, Eighth Conference on (Conf. Publ. N°426). 3-5 Julho 1996. p.240-242. Disponível em: <<http://rictec.capes.gov.br>>. Acesso em: 02 abril 2019.

NUNES, Alexandre Corrêa. **Desenvolvimento de um controlador de demanda de energia elétrica residencial**. 2012. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

LINHARES, Marcelo Saraiva. **Desenvolvimento de multimedidor eletrônico de energia elétrica**. 2015. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing and Application**, 2015. Disponível em: <http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847>. Acesso em: 10 agosto 2019.

BELCHIOR, F. N. Cap. 6 - **Transformadores para instrumentos**, 2014. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/7226089-Cap-6-transformadores-para-instrumentos-tp-transformador-de-potencial-tc-transformador-de-corrente.html>>. Acesso em: 23 setembro 2019.

PROCEL, Eletrobras. **Energia elétrica: Conceito, qualidade e tarifação**. 2009. Disponível em: <[https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/ Energia elétrica-qualidade.pdf](https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/Energia%20eltrica-qualidade.pdf)> . Acesso em: 22 set. 2019.